

光波分复用系统与维护

武文彦	主 编
张引发 王永强	副主编
杨永定 董 晔 陈明贵	参 编
潘 青 党利宏 张建朝	
肖 斌 陶 正	

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

这是一本关于光纤通信领域运行维护技术的图书，对提高专业运行维护人员的技术水平有很强的指导性。本书在光纤波分复用技术知识的基础上，对影响系统性能指标和传输质量的关键技术进行了较详细的阐述，介绍了我国目前在线运行的典型波分复用设备、WDM 系统维护常用测试仪表及使用方法、WDM 系统的发展及新技术应用，重点介绍 WDM 系统的维护内容、指标优化控制、故障分析及处理。

本书注重新技术、新知识、新标准的应用，编写力求系统清晰、概念准确、简明扼要、突出重点、通俗易懂、注重实际。内容贴近通信网络实际和学院教学，可作为本专业维护人员知识用书，也可作为从事光纤通信专业的工程技术人员和院校师生的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

光波分复用系统与维护 / 武文彦主编. —北京：电子工业出版社，2010.4
ISBN 978-7-121-10458-9

I. 光… II. 武… III. 光导纤维通信系统—维修 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 034997 号

责任编辑：窦 昊

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：396 千字

印 次：2010 年 4 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

序 言

信息化、数字化、网络化是现代社会的特征之一。在信息网络中，新的业务应用方式层出不穷，人们对网络的需求日新月异，各尽所能的网络服务给信息网络带来了极强的生命力。光纤通信以高速率、大容量、长距离的信息传递能力，在信息网络中扮演着极其重要的角色。

经过近 20 年的建设，我国的光纤通信已形成以“八纵八横”为骨干架构的核心网络，大规模的光缆线路建设已经完成，长途国干运行着数百万公里的 WDM, SDH 传输系统。近年来，随着科学技术的进步和社会的发展，传输领域的新技术不断出现，像一种无形的力量推动并改变着传统网络的组网方式和应用方式，改变着人们对网络的认识和管理观念。但从光纤传输的基础理论而言，目前或相当一段时间内 WDM 仍是完成长距离、大容量信息传递最成熟的手段，做好 WDM 传输系统的运行维护管理，研究和解决 WDM 系统运行中出现的新问题和新情况，不断提高运行维护质量，是运行维护管理人员常抓不懈的工作，是光缆网络稳定运行的可靠保证。

“光波分复用系统与维护”一书，是一本针对光纤通信专业技术人员做好 WDM 系统运行维护和管理工作的参考书。本书的编者们有的长期工作在光纤通信工程建设和系统运维管理的岗位，有的工作在光纤通信专业教学一线，参加过多条光缆干线的方案规划和建设，处理过多条长途光缆干线的指标优化和故障排除，主编或参与编写了多项光纤通信专业的标准法规制度，有着丰富的工作和教学经验。他们将多年的心血和积淀凝聚在此书中，奉献于读者面前，呈献给从事光纤通信的同行们，希望能够为培养和造就更多优秀的通信人才贡献一份力量。

电子工业出版社的编辑为本书的出版倾注了极大的热忱，做了大量的工作，谨此致以诚挚的谢意。

张 宁
2009 年 11 月

前 言

信息网络作为全球最重要的基础设施之一，推动着人类社会的进步与发展。信息网络中光纤通信传送网是完成大容量、远距离、高可靠信息传递的基础平台，承载着超过80%的信息传递任务，光纤通信的发展引领着网络世界的变革。

纵观光缆网络十余年的发展史，经历了由低速到高速、由电层到光层、由可管到可控、由人工到智能的重要发展过程，走过了 PDH，SDH 到 WDM 的演进之路。目前，光缆网络正处于传统网络向智能化网络发展的转折时期，OTN 和 ASON 等传输领域新技术正在逐步得到应用和推广。但是从光纤通信的传输技术来看，无论未来的网络如何演变，无论是基于 SDH 技术之上发展的 ASON 网络，还是基于 WDM 技术之上发展的 OTN 网络，在网络中完成大容量长距离的信息传输任务仍然要依靠 WDM 这一关键技术。特别是目前我国仍然在线运行着数百万公里的 WDM 传输系统，在相当一段时间内 WDM 系统在信息网络中仍然起着不可替代的作用。在今天随着传输网络向智能化方向的转变，信息传输容量的增大，传输距离的增长，传输质量对运维管理的压力随之增大，对运维人员的要求越来越高。基于这种情况，我们编写本书，主要是针对光纤通信运行维护人员，旨在提高本专业技术人员的知识水平，提高运行维护人员网络优化和故障排除技能，对不断提高的传输系统质量要求提供必备的基础知识和处理方法。

本书在光纤波分复用技术知识的基础上，对影响系统性能指标和传输质量的关键技术进行了较详细的阐述，内容贴近通信网络实际和贴近学院教学。介绍了我国目前在线运行的典型波分复用设备、WDM 系统维护常用测试仪表及使用方法、WDM 系统的发展及新技术应用，重点介绍 WDM 系统的维护内容、指标优化控制、故障分析及处理。本书是编者长期从事光纤通信专业工程建设、运行维护和教学工作的总结和多年工作经验的积淀，在编写中注重新技术、新知识、新标准的应用，力求系统清晰、概念准确、简明扼要、突出特点、通俗易懂、注重实际，对提高本专业运行维护人员的技术水平有很强的指导性。本书可作为本专业维护人员的知识用书，也可作为从事光纤通信专业的工程技术人员和院校师生的参考书。

本书由武文彦主编，张引发、王永强为副主编，参编人员有杨永定、董晔、陈明贵、潘青、党利宏、张建朝、肖斌、陶正。在本书的编写过程中，得到了张宁研究员的指导和支持，得到了卢平、杨洪卫和孙斌等同志的帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免出现疏漏和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 11 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光网络的发展及演进	1
1.2 WDM 技术的发展过程	2
1.2.1 光网络复用技术的发展	2
1.2.2 WDM 在传输网中的定位	4
1.2.3 WDM 系统的分类	5
1.2.4 WDM 的研究、应用现状与发展趋势	5
1.3 WDM 技术概述	7
1.3.1 相关定义	7
1.3.2 WDM 特点和优势	7
1.3.3 WDM 系统构成	9
1.3.4 常用器件	10
1.4 DWDM 与 SDH 的关系	17
1.5 承载 SDH 客户层信号的 WDM 分层结构	18
第 2 章 WDM 系统关键技术	20
2.1 光纤传输特性	20
2.1.1 光纤的衰减特性	20
2.1.2 光纤的色散特性	21
2.1.3 光纤的非线性效应	24
2.2 光纤的色散补偿技术	28
2.2.1 固定色散补偿	28
2.2.2 可调色散补偿	33
2.2.3 色散斜率补偿	35
2.3 前向纠错编码技术	37
2.3.1 误码纠错方法	37
2.3.2 FEC 编码方式	38
2.4 RZ 编码调制技术	40
2.4.1 NRZ 与 RZ 码简介	40
2.4.2 RZ 编码调制技术简介	41
2.5 监控技术	48

第 3 章 光放大器	49
3.1 概述	49
3.1.1 光放大器的作用	49
3.1.2 对光放大器的要求	50
3.1.3 光放大器的种类	52
3.2 掺铒光纤放大器 (EDFA)	54
3.2.1 EDFA 的工作原理	54
3.2.2 EDFA 的结构	55
3.2.3 EDFA 的性能参数	56
3.2.4 EDFA 的优缺点	60
3.2.5 遥泵技术 (ROPA)	60
3.3 光纤喇曼放大器 (FRA)	61
3.3.1 FRA 的工作原理	61
3.3.2 FRA 的性能	62
3.3.3 FRA 的优缺点	63
3.3.4 FRA 的种类	64
3.3.5 喇曼放大技术应用	65
第 4 章 WDM 系统传输距离设计	66
4.1 衰耗设计 (跨段)	66
4.2 色散设计 (光复用段)	67
4.2.1 一般计算公式	67
4.2.2 色散补偿	68
4.3 OSNR 设计	68
4.3.1 光信噪比 OSNR 的含义	68
4.3.2 EDFA 的噪声特性	69
4.3.3 理想系统的 OSNR 计算	69
4.3.4 通用系统的 OSNR 计算	70
4.4 BER 的计算	72
第 5 章 WDM 标准及测试	74
5.1 相关技术标准	74
5.1.1 系统工作波长及分配	74
5.1.2 主要性能指标	79
5.2 系统性能与测试	87
5.2.1 误码性能与测试	88
5.2.2 抖动性能与测试	89
5.2.3 输入抖动容限及测试	90

5.2.4 抖动转移特性91

5.2.5 主光通道的测试93

5.2.6 光通道代价97

第 6 章 WDM 系统的安全性与保护.....99

6.1 WDM 的安全性99

6.1.1 光纤和光接头的熔坏现象99

6.1.2 光“浪涌”现象99

6.1.3 功率自动减少功能（APR）100

6.1.4 线路自动关断功能（ALS）100

6.2 WDM 系统保护102

6.2.1 点到点应用保护102

6.2.2 环网应用保护103

第 7 章 WDM 典型设备介绍109

7.1 WDM 系统组成109

7.2 光转发板 OTU.....111

7.2.1 单板功能111

7.2.2 工作原理112

7.3 光合波板 OMU 和预均衡合波板 VMUX.....114

7.3.1 光合波板 OMU114

7.3.2 预均衡合波板 VMUX116

7.4 光分波板 ODU116

7.5 光合分波交织板 OCI117

7.6 宽带复用板 OBD.....118

7.7 光分插复用板 OAD.....120

7.8 光放大板 OA121

7.9 监控分插板 SDM122

7.10 分布式 RAMAN 放大板 DRA123

7.11 动态增益均衡板 DGE124

7.12 线路衰减补偿板 LAC125

7.13 光性能检测板 OPM.....126

7.14 主控板 NCP.....127

7.15 光监控通道板 OSC127

7.16 开销处理板 OHP128

7.17 160 波系统常见单板129

第 8 章 WDM 系统网络管理133

8.1 WDM 系统网管基本要求.....133

8.2 网元管理系统主要功能133

8.2.1 故障管理133

8.2.2 性能管理134

8.2.3 配置管理136

8.2.4 安全管理136

8.3 网元管理系统数据通道保护136

第 9 章 WDM 系统的维护内容及指标优化控制137

9.1 WDM 系统例行维护周期和维护项目137

9.2 WDM 系统的光功率调整及主要指标控制140

9.3 WDM 系统指标优化144

第 10 章 WDM 系统常见故障分析及处理147

10.1 WDM 系统的故障特点147

10.2 WDM 系统主要故障类型147

10.3 WDM 系统故障处理流程148

10.4 WDM 系统故障的常用处理方法148

10.5 WDM 系统故障的一般处理原则151

10.6 业务中断故障分析及处理152

10.6.1 外部原因故障的定位与排除153

10.6.2 设备原因的定位与排除154

10.6.3 案例 1：单板损坏导致业务中断154

10.6.4 案例 2：光缆线路故障导致业务中断155

10.7 误码故障分析及处理156

10.7.1 外部原因故障定位与排除156

10.7.2 设备原因的定位与排除157

10.7.3 案例 1：光功率异常导致误码157

10.7.4 案例 2：光尾纤问题导致误码158

10.8 业务瞬断故障分析及处理159

10.8.1 故障的定位与排除160

10.8.2 案例：光缆不好导致业务瞬断160

10.9 ECC 故障分析及处理161

10.9.1 故障的定位与排除162

10.9.2 案例 1：SCC 板故障导致 ECC 不通162

10.9.3 案例 2：ID 冲突导致 ECC 不通163

10.10 公务故障分析及处理164

10.10.1 故障的定位与排除164

10.10.2 案例 1：SC2 设置错误导致公务不通165

10.10.3 案例 2: 号码设置重复导致公务不通	165
10.11 设备对接故障分析及处理	166
10.11.1 外部原因故障定位与排除	167
10.11.2 设备原因的定位与排除	167
10.11.3 案例 1: 光纤错接导致设备对接故障	168
10.11.4 案例 2: 单板损坏导致设备对接故障	168
第 11 章 常用测试仪表及使用	170
11.1 ONT-30 光谱分析仪	170
11.2 ANT—20SE 光传输分析仪	180
11.3 SGT—4B 型光功率计	203
第 12 章 WDM 新技术应用及发展	206
12.1 WDM 超长距离传输的新技术	206
12.2 OTN 技术的体系架构和特点	214
缩略语	223
参考文献	233

第 1 章 概 述

随着科技的进步,时代的发展,信息技术正以其无形的力量推动着社会前进。在信息网络中光纤通信传送网承载着人类 80% 以上的信息传递业务,引领着网络世界的变革。光纤通信传送网的传输容量正在以平均每隔 9~12 个月增加一倍的速度扩展着,它的发展与应用已经成为网络时代中“新摩尔定律”的重要实践者。

纵观光缆网络的发展史,其在十余年的时间里,经历了由低速到高速、由电层到光层、由可管到可控、由人工到智能的不同发展阶段,走过了从 PDH 到 SDH、WDM,再到智能光网络的演进之路。

1.1 光网络的发展及演进

人类利用光进行通信的历史可以追溯到我国古代战争中的烽火狼烟。近百年来人们曾研究过光圈波导、气体透镜波导、空心金属波导管等,想利用它们作为传送光波的媒体以实现通信,但终因它们衰耗过大或者造价昂贵而无法实用化。一直到 1966 年 7 月,英籍华裔学者高锟博士(K. C. Kao)在 PIEEE 杂志上发表了一篇十分著名的文章《用于光频的光纤表面波导》,从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,设计了通信用光纤的波导结构;更重要的是科学地预言了制造通信用的超低衰耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,可把光纤的衰耗系数降低到 20 dB/km 以下,以实现通信。而当时世界上只能制造用于工业、医学方面的光纤,其衰耗系数在 1 000 dB/km 以上;对于制造衰耗系数在 20 dB/km 以下的光纤,被认为是可望而不可及的。以后的事实发展雄辩地证明了高锟博士文章的理论性和科学大胆预言的正确性,所以该文被誉为光纤通信的里程碑。

美国康宁玻璃公司在 1970 年根据高锟文章的设想,用改进型化学汽相沉积法(MCVD 法)制造出当时世界上第一根超低衰耗光纤,成为光纤通信爆炸性发展的导火索。虽然当时康宁玻璃公司制造出的光纤只有几米长,衰耗系数约 20 dB/km。但它毕竟证明了用当时的科学技术与工艺方法制造通信用的超低衰耗光纤是完全有可能的,也就是说找到了实现低衰耗传输光波的理想传输媒体,从而打开了光纤通信走向实用化的大门,使光纤通信的发展有了重大的实质性突破。

1970 年以后,世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力与物力,其来势之凶、规模之大、速度之快远远超出了人们的意料。从光纤衰耗系数看,1970 年是 20 dB/km,1972 年是 4 dB/km,1974 年是 1.1 dB/km,1976 年是 0.5 dB/km,1979 年是 0.2 dB/km,1990 年是 0.14 dB/km。这个指标已经接近石英光纤的理论衰耗极限值 0.1 dB/km。光纤通信技术的迅猛发展,说明高锟博士当年预见的衰耗系数在 20 dB/km 以下的水平显然是太保守了,但高锟博士对人类的贡献是巨大的,40 年后在 2009 年 10 月高锟等三位科学家获得 2009 年度诺贝尔物理学奖,理由是“他们帮助塑造了当今网络社会的基础”。

在光传输介质获得突破性进展的同时,1970 年,美国贝尔实验室研制出世界上第一

只在室温下连续波工作的砷化镓铝半导体激光器，为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的寿命达几十万小时的分布反馈式（DFB）、多量子阱（MQW）式单纵模激光器（SLM）。光接收器件也从简单的硅 PIN 光二极管发展到量子效率达 90% 以上的 III-V 族雪崩光二极管 APD。

正是光纤制造技术和光电器件制造技术的飞速发展，以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理机技术的发展，带动了光纤通信系统从小容量到大容量，从短距离到长距离，从低水平到高水平，从 PDH 到 SDH、DWDM，再到智能化光网络的迅猛发展。

光纤通信系统经历了几个发展阶段，人类用带宽极宽的光波作为传送信息的载体以实现通信，这一百年来人们梦寐以求的幻想在今天已成为活生生的现实，然而就目前的光纤通信而言，其实际应用仅是其潜在能力的 2% 左右，尚有巨大的潜力等待人们去开发利用。因此，光纤通信技术并未停滞不前，随着科技水平的发展，光纤通信向更高水平、更高阶段方向发展是历史之必然。

1.2 WDM 技术的发展过程

1.2.1 光网络复用技术的发展

光纤通信技术的应用首先解决了通信能够长距离传输的问题，但随着信息时代宽带高速业务的不断发展，对通信网的带宽和容量提出了更高的要求。因此，在传输系统中引入了复用技术。所谓复用技术是指利用光纤宽频带、大容量的特点，用一根光纤或光缆同时传输多路信号。光纤传输网的复用技术经历了空分复用（SDM）、时分复用（TDM）到波分复用（WDM）三个阶段的发展。SDM 技术设计简单、实用，但必须按信号复用的路数配置所需要的光纤传输芯数，投资效益较差；TDM 技术的应用很广泛，如 PDH，SDH，ATM，IP 都是基于 TDM 的传输技术，据统计，在 2.5 Gb/s（或 Gbps）系统以下（含 2.5 Gb/s 系统），系统每升级一次，每比特的传输成本下降 30% 左右。正因为如此，在过去的系统升级中，人们首先想到并采用的是 TDM 技术，缺点是线路利用率较低；WDM 技术是在一根光纤上承载多个波长（信道）的复用技术，这种技术的成功应用解决了通信能够长距离、大容量传输的问题，并成为完成信息骨干网络传输的主要手段。

在多路信号传输系统中，信号的复用方式对系统的性能和造价起着重要作用。就 SDH 电时分复用而言，1992 年商用速率为 155 Mb/s，到 1998 年已经发展到 10 Gb/s，现在先进国家的水平已达到 40 Gb/s。但是，由于电子迁移速率的限制，进一步提高电时分复用的速率已经很困难，光电器件成本也很高，电子技术已成为光纤通信进一步发展的瓶颈。为了克服这一瓶颈，人们自然想到了在光域中进行复用，以进一步增大系统容量，提高线路利用率，降低经营成本。光复用的主要技术有：光时分复用（optical time division multiplexing，OTDM）、光码分复用（optical code division multiplexing，OCDM），光波分复用（wavelength division multiplexing，WDM）和光频分复用（optical frequency division multiplexing，OFDM）。

光时分复用（OTDM）指利用高速光开关把多路光信号在时域里复用到一路上的技术。其基本原理是在发送端的同一载波波长上，把时间分割成周期性的帧，每一帧再分割成若干个时隙，然后根据一定的时隙分配原则，使每个信源在每帧内只能按指定的时

隙向信道发送信号，接收端在同步的条件下，分别在各个时隙中取回各自的信号而不混乱，光时分复用原理示意图如图 1-1 所示。利用光时分复用技术可以获得较高的速率带宽比，可克服掺铒光纤放大器（erbium-doped fiber amplifier, EDFA）增益不平坦、四波混频（four wave mixing, FWM）、非线性效应等诸多因素限制，而且可解决复用端口的竞争，增加全光网络的灵活性。但由于其关键技术比较复杂，实现这些技术的器件特别昂贵，制作和实现均很困难，并且由于偏振模色散对高速信号的限制，所以这项技术迟迟没有得到很大的发展和应用。

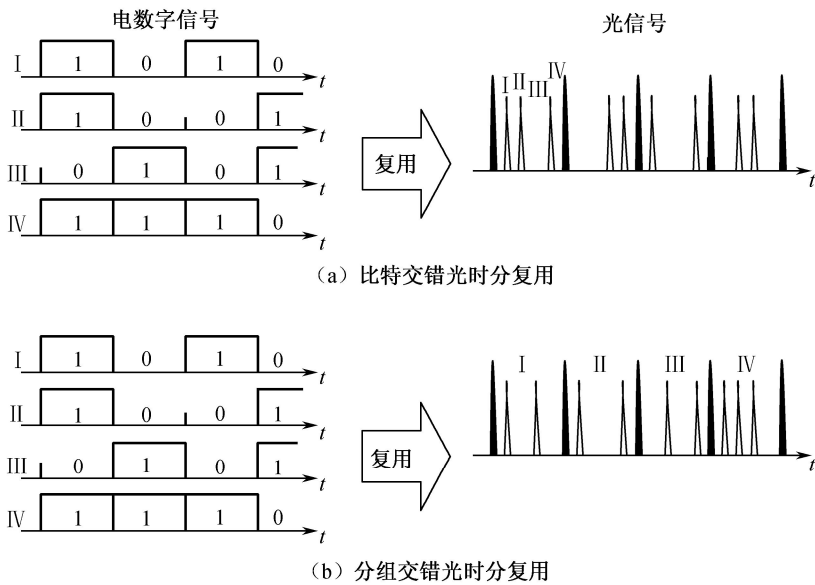


图 1-1 光时分复用原理示意图

光码分复用（OCDM）技术是 CDM（Code Division Multiplexing）技术和光纤通信技术相结合的产物，在这种复用技术中，每个信道不是占用一个给定的波长、频率或者时隙，而是以一个特有的编码脉冲序列方式来传送其比特信息。其基本原理是不同信道的信号用互成正交的不同码序列来填充，经过填充的信道信号调制在同一光波上，在光纤信道中传输，接收端用与发送方向相同的码序列进行相关接收，即可恢复出原信道的信号，OCDM 复用示意图如图 1-2 所示。由于采用的是正交码，相关接收时不会产生相互干扰。光码分复用技术能极大地改善网络的性能，提高网络的通信容量，提高系统信噪比，增强系统保密性，增加网络灵活性。但 OCDM 实用化还有一些障碍，在非相干光 CDM 方面，由于正交码的数量有限，码间干扰较大，限制了用户数量；在相干光 CDM 方面，存在着激光源的频率稳定度差，光纤极化态不稳定及光脉冲相位难以控制等主要问题。

光波分复用（WDM）技术是在一根光纤中同时传输多波长光信号的一项技术。其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合（复用）起来，并耦合到光缆线路上的同一根光纤中进行传输，在接收端将组合波长的光信号分开（解复用），并进一步处理，恢复出原信号后送入不同的终端。它是目前研究最多、发展最快、应用最为广泛的光复用技术。经过多年的发展和应用，波分复用技术已趋于成熟，而且越来越成为现代通信系

统中不可替代的传输技术。目前，波分复用系统的传输容量正以极快的速度增长，直接基于 WDM 传输的业务也越来越多。

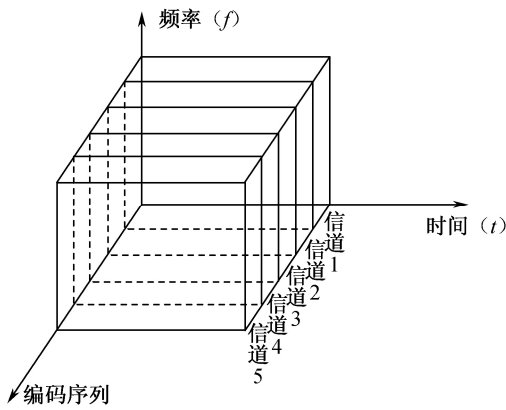


图 1-2 OCDS 复用示意图

为了进一步提高光纤带宽利用率，相邻两光载波的间隔将越来越小，一般认为：当相邻光载波的间隔小到 0.1 nm（10 GHz）以下时，此时的复用称为光频分复用。它与波分复用在本质上是没有什么区别的。频率表示每秒出现的波峰数，波长表示此电磁波的一个波峰到另一个相邻波峰的长度，两者互为倒数关系。在光载波间隔比较大时，用波长衡量比较方便，一般称为波分复用。而当光载波间隔比较小时，用波长来衡量就显得不方便了，习惯称为频分复用系统。

波分复用技术从 20 世纪 80 年代末、90 年代初，光纤通信兴起之初就出现了，AT&T 贝尔实验室的厉鼎毅（T. Y. Lee）博士大力倡导波分复用（WDM）技术，两波长 WDM（1 310 nm/1 550 nm）系统在 20 世纪 80 年代就在使用，速率为 2×1.7 Gb/s。

WDM 发展迅速的主要原因在于以下几方面：

（1）TDM 10 Gb/s 面临着电子元器件的挑战，TDM 方式已日益接近硅和镓砷技术的极限，没有太多的潜力可挖，并且传输设备的价格也很高。

（2）已敷设 G.652 光纤 1 550 nm 窗口的高色散限制了 TDM 10 Gb/s 系统的传输，光纤色度色散和偏振模色散的影响日益加重。人们正越来越多地把兴趣从电复用转移到光复用，即从光域上用各种复用方式来改进传输效率，提高复用速率，而 WDM 技术是目前能够商用化的最简单的光复用技术。

（3）光电器件的迅速发展。1985 年英国南安普顿大学首先研制出掺铒光纤放大器。1990 年，比瑞利（Pirelli）研制出第一台商用光纤放大器。EDFA 的成熟和商用化，使光放大区域（1 530～1 565 nm）采用 WDM 技术成为可能。

从技术和经济的角度看，WDM 技术都是目前最经济可行的扩容技术手段。

1.2.2 WDM 在传输网中的定位

从 WDM 系统发展的方向来看，将光分插复用器（OADM）和光交叉连接器（OXC）结合将形成一个光层网络——光传送网。未来光传送网的发展就应是在 SDH 电网络层面以下建设光网络层，即传送网将在拓扑上分为光、电两个网络层面，而 WDM 系统则是

“光网络层”的核心部分。

WDM 系统在传送网中的位置如图 1-3 所示, 其中 SDH 和 WDM 是客户层与服务层的关系。PDH, ATM 和 IP 等信号与 SDH 也是客户层与服务层的关系。

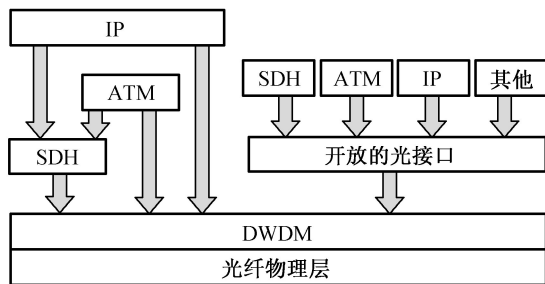


图 1-3 WDM 系统在传送网中的位置

1.2.3 WDM 系统的分类

WDM 系统分为无电中继系统和无中继系统两类。

无电中继长距离传输系统是指发射端和接收端之间光信号不需要经过光/电/光 (optical electrical optical, OEO) 的转化, 只需要经过光放大器和其他无源光器件对光信号进行端到端的传输。根据我国关于 WDM 系统的行业标准, 无电中继光纤传送系统就传输距离而言, 可以划分为以下 3 种: 长度在 1 000 km 以下的称常规长距离传输系统 LH (Long Haul); 长度在 1 000~2 000 km 范围内的称亚超长距离传输系统 ELH (Enhanced Long Haul)。长度大于 2 000 km 以上的称超长距离传输系统 ULH (Ultra-Long Haul)。

无中继长距离传输系统是指发射端和接收端之间既没有 OEO 也没有光放大器设备对传输的光信号进行处理,一般把超过 120 km 的无中继传输系统称为超长无中继传输系统。

由于技术上没有显著的差别，本书把 ELH, ULH 和超长无中继传输系统统称为 ULH 传输系统。书中无特指超长距离 ULH 传输系统外，一般均为常规距离的 WDM 传输系统。

1.2.4 WDM 的研究、应用现状与发展趋势

目前，全球在建的商用光纤通信系统基本上都是 WDM 系统，同时原有的光纤通信系统也都陆续被改造成 WDM 系统。随着 WDM 分插技术和网管技术的发展，WDM 系统将进入城域网领域，为未来的全光交换网络提供技术支撑。在 WDM 研究开发方面，美国和西欧国家一直处于领先地位。美国按照其 NGI 的规划，由国防部下属的国防高级项目研究署牵头，以政府研究开发项目的形式，通过大学、国家实验室、电信设备生产商和电信业务提供商的联合协作，先后进行了多个 WDM 光传送网项目的研究开发，如 MONET, NTON, WEST 等。

我国也十分重视 WDM 技术,除了理论研究和跟踪外,还对商用化试验做了很多开发工作。目前, WDM 系统在我国骨干网和省二级骨干传送网的网络上得到了广泛的应用,基于 10 Gb/s 和 2.5 Gb/s 的 DWDM 系统已经成为基本的传送平台,基于 10 Gb/s

单通路速率的 400 Gb/s 或 800 Gb/s 系统在我国干线建设中已经大量商用。较为成熟的 ULH（超长距离）传输距离为 3 000 km，波长间隔在 50 GHz，使用 C+L 波段的 160 波系统。

超大容量 WDM 系统的发展不仅彻底发掘了巨大的光传输链路的容量，而且也成为 IP 业务快速发展的催化剂和下一代光传送网灵活光节点的基础。从长远发展来看，WDM 主要技术会朝多个方向发展。

1. 单波长传输速率不断提高

单波长速率由 155 Mb/s 发展到目前的 10 Gb/s，而 40 Gb/s 速率的系统已进入实验阶段，技术日渐成熟。利用 TDM 和 WDM 两种技术进行网络扩容将是未来应用的方向。

2. 更多波长复用数量

短短的几年时间内，WDM 相邻波长间隔经历了 200 GHz—100 GHz—50 GHz（目前商用系统的波道间隔），乃至 25 GHz 的演变，每前进一步，系统可容纳的波长数就可以增加一倍。随着技术的不断发展，WDM 系统的工作波段已由 C 波段发展到 L 波段、S 波段甚至全波段。如中兴通讯的 ZXWM M900 设备，最高可提供 160 波的复用。

3. 超长的全光传输距离

通过提高全光传输的距离，减少电再生点的数量，可降低建网的初始成本和运营成本。传统的 WDM 系统采用 EDFA 延长无电中继的传输距离。目前，通过分布式喇曼放大器、超强前向纠错技术（FEC）、色散管理技术、光均衡技术以及高效的调制格式等，传输距离可从目前的 600 km 左右扩展到 2 000 km 以上。

4. 从点到点 WDM 走向全光网络

全光网络是未来光纤传送网的发展方向。普通的点到点 WDM 系统，主要由光终端复用器（OTM）组成，尽管有巨大的传输容量，但只提供了原始的传输带宽，组网能力不灵活。随着电交叉系统的不断发展，节点容量的不断扩大，点到点组网显然无法跟上网络传输链路容量的增长速度。进一步扩容的希望转向光节点，即光分插复用器（OADM）和光交叉连接器（OXC）。在全光网络中，各种业务的上下、交叉连接等都是在光路上通过对光信号进行调度来实现的。

通过 OADM 可构成链形、环形光网络。OADM 设备控制不同波长信道的光信号传至适当的位置，并可实现光层业务的保护和恢复。WDM 系统可以与光分插复用器 OADM、光交叉连接设备 OXC 混合使用，以组成具有高度灵活性、高可靠性、高生存性的全光网络。

5. IP over DWDM 技术的发展

Internet 骨干网的带宽增长迅猛，如果不采用 WDM 技术，那么仅 Internet 的数据流量就可以占满整个单波光纤系统的容量（目前，商用化单波长光纤系统的最大传输速率为 10 Gb/s）。因此，IP over DWDM 将是未来网络通信的主要技术。

1.3 WDM 技术概述

1.3.1 相关定义

波分复用技术，可以承载 SDH 业务、IP 业务和 ATM 业务，只需通过增加波长（信道）来实现系统扩容，即在一根物理光纤上提供多个虚拟的光纤通道，也可以称为虚拟光纤。由于 WDM 系统技术的经济性与有效性，使之成为当前光纤通信网络最广泛使用的光波复用技术。WDM 通常有 3 种复用方式，即 1 310 nm 和 1 550 nm 波长的波分复用、粗波分复用（CWDM）和密集波分复用（DWDM）。

1) 1 310 nm 和 1 550 nm 波长的波分复用

这是最初波分复用系统的使用情况。20 世纪 80 年代初人们在光纤的两个低衰耗窗口 1 310 nm 和 1 550 nm 各传送一路光波长信号，利用 WDM 技术实现单纤双窗口传输。该系统比较简单，一般采用熔融的复用器件。

2) 密集波分复用（DWDM）

DWDM 技术是指相邻波长间隔较小的 WDM 技术，工作波长位于 1 550 nm 窗口。可以在一个光纤上承载 8~160 个波长。主要应用于长距离传输系统。

最早的波分复用技术是将 1 310 nm 和 1 550 nm 的两波长复用，波长间隔一般为数十纳米。随着 EDFA 的商用化，新的 WDM 系统只用 1 550 nm 窗口，这些 WDM 系统的相邻波长间隔比较窄（小于 1.6 nm），为了区别传统的 WDM 系统，称为密集波分复用系统，即 DWDM 系统。现在波分复用技术（WDM）通常专指密集波分复用技术（DWDM）。

3) 粗波分复用（CWDM）

CWDM 技术是指相邻波长间隔较大的 WDM 技术，相邻信道的间距一般不小于 20 nm，波长数目一般为 4 波或 8 波，最多 16 波。CWDM 使用 1 200~1 700 nm 窗口。

CWDM 采用非制冷激光器、无光放大器件，成本较 DWDM 低；缺点是容量小、传输距离短。因此，CWDM 技术适用于短距离、高带宽、接入点密集的通信应用场合，如大楼内或大楼之间的网络通信。

1.3.2 WDM 特点和优势

1. 超大的传输容量

WDM 系统中的各波长相互独立，可透明传输不同的业务，如 SDH，IP，ATM 等信号，实现多种信号的混合传输。多个光信号通过采用将不同的波长复用到一根光纤中传输，每个波长上承载不同信号，这样大大提高了光纤容量，极大地节约了光纤资源，降低线路建设成本。系统复用的光通路速率可以为 2.5 Gb/s，10 Gb/s 等，而复用光通路的数量可以是 40 个、80 个甚至更多，所以系统的传输容量可达到 1 600 Gb/s 的水平。而这样巨大的传输容量是 TDM 方式目前根本无法做到的。

目前，160×10 Gb/s 的 WDM 系统已经达到商用化水平。

2. 超长的传输距离

掺铒光纤放大器 (EDFA) 具有高增益、宽带宽, 噪声较低等优点, 在光纤通信中得到了广泛的应用。它可以覆盖整个 1 550 nm 波长的 C 波段或 L 波段。所以用一个带宽很宽的 EDFA, 就可以对 WDM 系统进行放大, 以实现长距离传输, 如 640 km。

喇曼光纤放大器比 EDFA 具有更低的噪声, 用它可以实现超长距离传输如 2 000 km 以上。

由于用一个光放大器可以对 WDM 系统的所有复用光通路信号进行放大, 避免了每个光通路都需要一个光放大器的弊病, 所以可节省大量的电中继设备, 减少设备数量, 大大降低成本。

3. 节约光纤资源

N 个波长复用后在 1 根光纤中传输, 1 根光纤相当于 N 根“虚拟光纤”, 可以节省大量的光纤, 降低了线路成本。对单波长系统而言, 1 个 SDH 系统就需要 1 对光纤, 而对 WDM 系统来讲, 不管有多少个 SDH 分系统, 整个 WDM 系统只需要 1 对光纤就够了。如对于 32×2.5 Gb/s 系统来说, 单波长系统需要 64 根光纤, 而 WDM 系统仅需要 2 根光纤。对于光纤紧张的线路的系统扩容也非常方便, 在功率允许的情况下无须对线路进行改造, 节省投资。

节约光纤资源这一点也许对于市话中继网络并非十分重要, 但对于系统扩容或长途干线, 尤其是对于租用光纤的运营者来说就显得非常难能可贵了。

4. 平滑的升级扩容

只要增加复用的光波长通路数与相应设备, 就可以增加系统的传输容量以实现系统扩容, 扩容时对已经投入使用的光通路不会产生不良影响。所以 WDM 系统的升级扩容是平滑的, 而且方便易行, 从而最大限度地保护了建设初期的投资。

WDM 系统复用的各波长光通路是相互独立的, 所以各光通路可以分别透明地传送不同的业务信号如语音、数据和图像等, 彼此互不干扰, 从而给使用者带来了极大的方便。

5. 对光纤的色散并无过高要求

对 WDM 系统来讲, 不管系统的传输速率有多高、传输容量有多大, 它对光纤色散的要求, 基本上就是单个波长通路速率信号对光纤色散的要求。如 80 Gb/s 的 WDM 系统 (32×2.5 Gb/s), 对光纤色度色散系数的要求就是单个 2.5 Gb/s 系统对光纤色度色散系数的要求, 一般的 G.652 光纤都能满足。

但 TDM 方式的高速率信号却不同, 其传输速率越高, 传输同样的距离要求光纤的色度色散系数越小。以目前敷设量最大的 G.652 光纤为例, 用它直接传输 2.5 Gb/s 速率的光信号是没有多大问题的, 但若以 TDM 方式传输 10 Gb/s 速率的光信号则会遇到麻烦。

6. 可充分利用成熟的 TDM 技术

以 TDM 方式提高传输速率虽然在降低成本方面具有巨大的吸引力, 但也面临着许多因素的限制, 如制造工艺、电子器件工作速率的限制, 等等。据分析, TDM 方式的

40 Gb/s 系统已经非常接近电子器件工作速率的极限，再进一步提高速率是相当困难的（至少目前技术水平如此）。

而 WDM 技术则不然，它可以充分利用现已成熟的 TDM 技术如 10 Gb/s，相当容易地使系统的传输容量达到 400 Gb/s 或 800 Gb/s 水平。

目前 TDM 方式的 10 Gb/s 光传输技术已经十分成熟，所以可把几个甚至几十个 10 Gb/s 光传输系统作为波长复用通路进行波分复用，使传输容量成几倍甚至几十倍地增加，达到 800 Gb/s 甚至更高水平。而用 TDM 方式达到如此高的传输容量目前几乎是不可能的。

1.3.3 WDM 系统构成

一般来说，WDM 系统主要由五个部分组成：光发射机、光中继放大、光接收机、光监控信道和网络管理系统。WDM 系统总体结构示意图如图 1-4 所示。

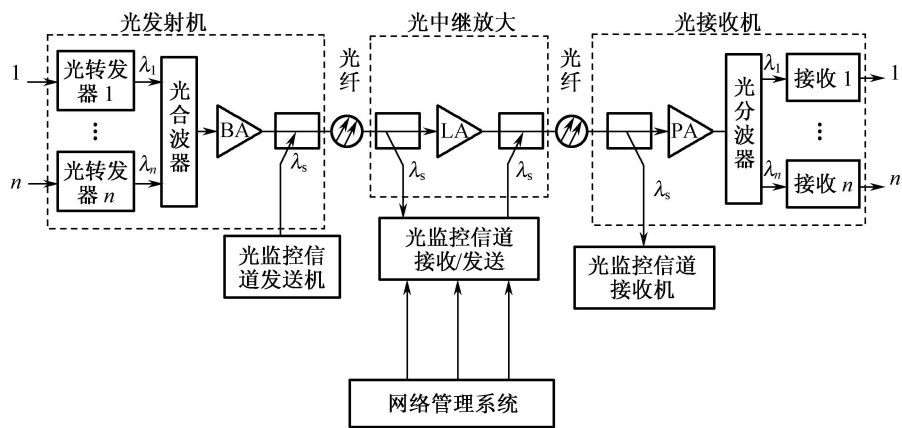


图 1-4 WDM 系统总体结构示意图

光发射机是 WDM 系统的核心，除了对 WDM 系统中发射激光器的中心波长有特殊的要求外，还需要根据 WDM 系统的不同应用（主要是传输光纤的类型和无电中继传输的距离）来选择具有一定色度色散容限的发射机。在发送端首先将终端设备（如 SDH 端机）送来的光信号，利用光波长转换器（OTU）把非特定波长的光信号转换成具有稳定的特定波长的光信号；利用合波器（或称为复用器）将多通路光信号合成一路；然后通过光功率放大器（BA）放大输出，注入光纤线路。

经过长距离光纤传输后（80~120 km），需要对光信号进行光中继放大。目前使用的光放大器有掺铒光纤放大器（erbium-doped fiber amplifier, EDFA）和光纤喇曼放大器（fiber Raman amplifier, FRA）。在 WDM 系统中，必须采用增益平坦技术，使光放大器对不同波长的光信号具有相同的放大增益，同时，还要考虑到不同数量的光信道同时工作的各种情况，能够保证光信道的增益竞争不影响传输性能。在应用时，根据光放大器的放置位置，可将光放大器用做“中继放大或线路放大器（LA）”、“后置功率放大器（BA）”和“前置放大器（PA）”。

在接收端，光前置放大器（PA）放大经传输而衰减的主信道光信号后，利用分波器（或称为解复用器）从主信道光信号中分出特定波长的光信号送往各终端设备。接收机不

但要满足一般接收机对光信号灵敏度、过载功率等参数的要求，还要能承受具有一定光噪声的信号，要有足够的电带宽性能。

光监控信道主要功能是监控系统内各信道的传输情况。在发送端，插入本节点产生的波长为 λ_s (1 510 nm) 的光监控信号，与主信道的光信号合波输出；在接收端，将接收到的光信号分波，输出 λ_s (1 510 nm) 波长的光监控信号和业务信道光信号。帧同步字节、公务字节和网管所用的开销字节等都是通过光监控信道来传递的。

网络管理系统通过光监控信道物理层传送开销字节到其他节点或接收来自其他节点的开销字节，对 WDM 系统进行管理，实现配置管理、故障管理、性能管理、安全管理等功能，并与上层管理系统（如 TMN）相连。

1.3.4 常用器件

1. 波分复用器件

波分复用器件包括光复用器与光解复用器，又称为合波器（OM）与分波器（OD），是对光波波长进行合成与分离的光无源器件，也是 WDM 网络中的关键器件，实际上均为光学滤波器。对波分复用器与解复用器共同的要求是：复用信道数量要足够多、插入损耗小、串音衰减大和通带范围宽。从原理上讲，合波器与分波器是相同的，只需要改变输入、输出的方向。但是在实际使用中，光复用器与光解复用器的最大不同在于：解复用器的输出光纤直接与光检测器相连，芯径与数值孔径可以做得大些，因此制造低插入损耗的解复用器并不太难；而复用器的输出光纤必须为传输光纤，不能任意加大芯径和数值孔径，减小输入光纤的芯径和数值孔径，会增加光源到输入光纤的耦合损耗，所以复用器的插入损耗一般比较大。WDM 系统中使用的波分复用器件的性能满足 ITU-T G.671 及相关建议的要求。

目前常用的光波分复用器主要有：光栅型波分复用器、介质薄膜型波分复用器（DTF）、阵列波导波分复用器（AWG）、耦合型波分复用器。DWDM 系统与光波分复用器件对应关系如表 1.1 所示。

表 1.1 DWDM 系统与光波分复用器件的对应关系

光波分复用器类型	合波器			分波器		
	32 波以下	40 波	80 波以上	32 波以下	40 波	80 波以上
耦合型	√	—	—	—	—	—
阵列波导型	√	√	—	√	√	—
介质薄膜型	√	√	—	√	√	—
光栅型	—	—	√	—	—	√

光合、分波器性能的优劣对系统的传输质量有决定性的影响，可以用以下性能指标进行衡量。

1) 复用通路数

复用通路数代表波分复用器件能进行复用与解复用的光波长通路数量，与器件的分辨率、隔离度等参数密切相关。显然复用波长通路数越多越好，复用通路数越多，WDM

系统的传输容量会越大。但受分辨率、隔离度等性能的制约，不同类型波分复用器件的最大复用通路数不同，如 DTF 型的波分复用器件，复用通路数难以超过 16 个，而 AWG 型与光栅型的波分复用器件，复用通路数可在 32 个以上。

2) 插入损耗

插入损耗是指系统接入光波分复用器件后所产生的附加功率损耗。通常插入损耗用波分复用器件输入端口与输出端口的光功率之比表示，即

$$\alpha_c = -10 \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

式中， P_i 为发送到输入端口的光功率； P_o 为从输出端口接收到的光功率。

插入损耗直接影响 WDM 系统的传输距离。假设波分复用器件的插损值为 7 dB，那么合、分波器加在一起的插损值就接近 15 dB，导致系统在 1 550 nm 波长区的再生传输距离，可能从 80 km 减少到 30~40 km，这样短的传输距离是很难满足实际需求的。掺铒光纤放大器的出现，使 WDM 实现了长距离传输。不同类型的波分复用器件插损值不同，插损越小越好，一般规定小于 10 dB，但性能良好者可望在 5 dB 以下。

3) 隔离度

表征分波器本身对其各复用光通路信号的彼此隔离程度即隔离度。通路的隔离度越高，波分复用器件的选频特性就越好，串扰抑制比也越大，各复用光通路之间的相互干扰影响也越小。通路隔离度可以细分为相邻通路隔离度与非相邻通路隔离度两种。

(1) 相邻通路隔离度代表分波器本身对其相邻的两个复用通路光信号的隔离程度。具体含义是，某复用光通路的输出光功率，和具有相同光功率输出的相邻光通路信号在本通路的泄露光功率之比。

其值越大越好，如大于 30 dB，即相邻光通路泄露光功率仅为本通路输出光功率的千分之一，对本通路信号的不良影响自然很小。

(2) 非相邻通路隔离度代表分波器本身对其非相邻复用通路光信号的隔离程度。具体含义是，某复用光通路的输出光功率，和非相邻光通路在本通路的泄露光功率之比。

同样道理，其值自然越大越好，如大于 30 dB。

隔离度仅对波长敏感型器件（如薄膜滤波器型和 AWG 型器件）有意义。对于耦合型器件，此参数无意义。

4) 温度特性

波分复用器件的温度特性用它的温度系数来表征，而温度系数是指因环境温度变化而引起的复用通道中心工作波长的偏移。虽然波分复用器件是无源器件，但其各复用通道的中心工作频率也会随着环境温度的变化而发生偏移。如果偏移过大，会破坏波分复用器件的带通特性，严重者可能导致复用通道的光信号落于带外，无法进行正常的光传输。

因此，波分复用器件的温度系数越小越好，如小于 0.5 pm/°C。

5) 带宽

该参数仅对分波器有意义，分波器的带宽有 2 个指标，即 -0.5 dB 带宽和 -20 dB 带宽。它们分别代表当分波器的插入损耗变化 0.5 dB 和 20 dB 时，分波器工作波长范围的变化值。

-0.5 dB 带宽是描述分波器带通特性的，所以其值越大越好，其值越大，说明插入损耗变化在 0.5 dB 范围内的波长越宽。而-20 dB 带宽则是描述分波器阻带特性的，阻带特性曲线应该陡峭，所以其值越小越好，其值越小，说明它对带外的波长衰减越大。

6) 反射系数

在波分复用器件的输入端，反射光功率与入射光功率之比为反射系数。反射系数值越小越好。

7) 偏振相关损耗 (PDL)

偏振相关损耗是指光信号以不同的偏振状态输入时（如线偏振、圆偏振、椭圆偏振等），对应输出端口插入损耗的最大变化值。

光是频率极高的电磁波，所以存在波的振动方向问题（偏振）。输入到波分复用器件中的各复用通路光信号，其偏振态不可能完全一致，而同一波分复用器件对不同偏振态的光波，其衰减作用也略有不同。PDL 值越小越好。

2. 光源

光源的作用是产生激光，常用于光通信系统中的光源有发光二极管（light emitting diode, LED）和半导体激光器（laser diode, LD）。LED 主要应用在早期的低速光通信系统中，WDM 系统中所使用的光源主要是半导体激光器 LD。

WDM 系统的工作波长间隔较为密集，一般波长间隔为几纳米到零点几纳米，这就要求激光器工作在一个标准波长上，并且具有很好的稳定性；另一方面，WDM 系统的无电再生中继长度从单个 SDH 系统传输的 50~60 km 通过光放大器技术，增加到了 500~600 km。中继距离的延长对 WDM 的光源技术提出了更高的要求，不仅要考虑到色散对系统的影响（要求光源的谱宽要窄），同时为了克服光纤的非线性效应（如受激布里渊散射效应 SBS、受激喇曼散射效应 SRS、自相位调制效应 SPM、交叉相位调制效应 XPM、调制的不稳定性以及四波混频 FWM 效应等），要求 WDM 系统的光源也必须使用技术更为先进、性能更为优越的激光器。

WDM 系统对光源器件提出了相当苛刻的要求，即稳定的工作波长、高色散容限与低啁啾。

1) 稳定的工作波长

光源发射的光波长必须符合 G.692 规定的标称波长，其偏差应在规定范围内，如不超过 ± 10 GHz，只有这样才能在有限的光波范围容纳数量众多的复用通道光信号，并且彼此之间不产生串扰。此外，光源发射的波长应该非常稳定，随温度、时间的变化所发生的偏移越小越好。

2) 高色散容限

为了满足超长距离传输的要求，光源器件应具有很高的色散容限。因为系统的传输距离既可能会受到系统损耗的限制，也可能会受到系统色散的限制，而在高码速率传输的情况下，往往是色散受限占主要地位。光放大器的使用只解决了损耗受限的难题，因未对光脉冲进行波形处理，所以未解决色散受限问题，解决色散受限可选用色散系数较低的光纤，或选用高色散容限的激光器光源，或采用色散补偿的办法来解决。

3) 低啁啾

采用传统的直接调制方式，激光器光源工作在高码速率时会产生所谓啁啾效应，它使光源的发射波长发生偏移，破坏了系统的正常工作，因此应该尽力减小啁啾效应。

3. 光波长转换器（optical transition unit, OTU）

波长转换器的作用就是进行波长转换，对外它提供 G.957 光接口以接入常规的 SDH 设备，使系统具有开放性，从而可以接入任何厂家、符合 G.957 规范的 SDH 设备。对内则提供符合 G.692 的光接口，满足 WDM 的一些特殊要求，比如频率要求、色散容限的要求等。

在 WDM 系统中，是使用 OTU 单元来实现对光信号的转化，它把非标准的波长转换为 ITU-T 所规范的标准波长，以满足系统的波长兼容性。

OTU 还可实现 3R 功能，即有定时再生电路。

在目前已商用的产品中，OTU 使用的依然是光/电/光（O/E/O）的变换。符合 G.957 的发射机与光转发器合并使用示意图如图 1-5 所示。

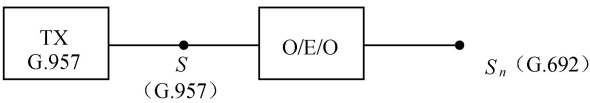


图 1-5 符合 G.957 的发射机与光转发器合并使用示意图

WDM 系统可以分为集成式系统和开放式系统，其中开放式系统中就使用了光波长转换器。这是考虑到使各波长之间的影响最小和更多厂家的设备能互通工作，WDM 使用的激光器发出的光的中心波长、波长间隔、中心频率偏移等均有严格的规定，必须符合 ITU-T G.692 建议。

1) 集成式系统

集成式系统就是 SDH 终端具有满足 G.692 建议的光接口：标准的光波长、满足长距离传输的光源。这两项指标都是当前的 SDH 系统不要求的，把标准的光波长和长色散受限距离的光源集成在 SDH 系统中，整个系统的构造比较简单，没有增加多余设备，如图 1-6 所示，OA 为光放大器。

集成式 WDM 系统要求 SDH 系统与 WDM 系统应该是一个厂家，在网络管理上很难把 SDH 系统与 WDM 系统彻底分开。

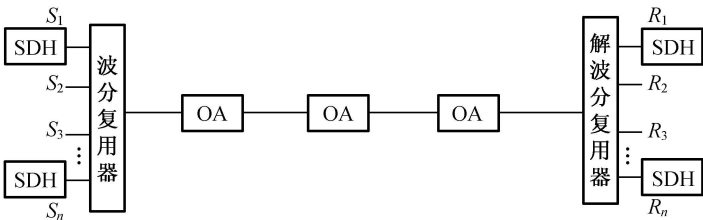


图 1-6 集成式 WDM 系统

2) 开放式系统

开放式系统就是在波分复用器前加入波长转换器,将 SDH 非规范的波长转换为标准波长,开放式 WDM 系统如图 1-7 所示。开放是指在同一 WDM 系统中,可以接入不同厂家的 SDH 系统。OTU 对输入端的信号波长没有特殊要求,可以兼容任意厂家的信号。输出端则满足 G.692 的光接口:标准光波长、满足长距离传输的光源。具有 OTU 的 WDM 系统,不再要求 SDH 系统具有 G.692 接口,可以继续使用符合 G.957 接口的 SDH 设备,接纳过去的 SDH 系统,实现不同厂家的 SDH 系统工作在同一个 WDM 系统内,但 OTU 的引入会增加成本。

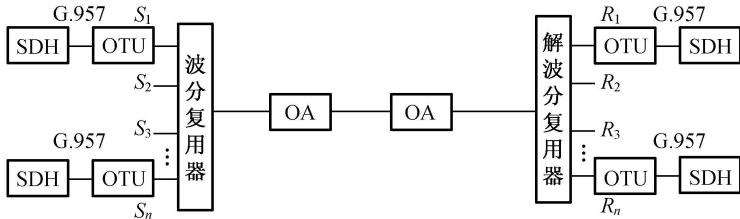


图 1-7 开放式 WDM 系统

由图 1-7 可见, OTU 有发端波长转换器与收端波长转换器之分。

开放式 WDM 系统适用于多厂家环境,彻底实现 SDH 与 WDM 系统分开。在开放式 WDM 系统中, OTU 应纳入 WDM 系统的网元管理范围,即把它看做 WDM 系统的一个网元,通过 WDM 的网元管理系统进行配置与管理。

4. 光接口的主要参数

WDM 系统中各复用通路的光接口参数含义、要求等,大部分与常规 SDH (G.957) 的光接口参数类似,但在具体要求上却有所不同;还有一些是常规 SDH 光接口所不要求的,如光源的发射波长(中心工作频率)与偏移、接收端的光信噪比(OSNR)等。

1) 单个发送机输出端参数

(1) -20 dB 谱宽为单纵模激光器(single longitudinal mode laser diode, SLM-LD)的最大峰值光功率下降 20 dB 时的最大全宽。

(2) 边模抑制比为在最坏反射条件下,全调制时光源的主模光功率与最大边模光功率之比。

边模抑制比的定义主要是为了减少模式分配噪声造成的误码率(bit error ration, BER)性能劣化。由于模式分配噪声是一种低概率的瞬态效果,在伪随机信号序列或连续信号上测量 SMSR 时,有可能低估模式分配噪声的影响。该参数仅对直接调制的激光器有效,其规范值比 G.957 SDH 光发送机要略严格一些,如大于 35 dB (G.957 规范为大于 30 dB)。

(3) 平均发送功率为发送机发送伪随机序列信号时,在参考点 S_n 测得的平均光功率。

与常规的 SDH 光发送机相类似,但每个复用通道的平均发送光功率不宜过大,如不超过 +5 dBm。一方面因发光功率过大会缩短激光器的寿命,另一方面由于合波器之后一般有光功率放大器 WBA,所以过大的发光功率不但无益反而有可能超出光功率放大器

WBA 的允许输入范围。

(4) 消光比为在最坏反射条件下，全调制时的“1”码的平均光功率与“0”码的平均光功率之比。

其规范值比 G.957 SDH 光发送机要略严格一些，如大于 10 dB (G.957 规范为大于 8.2 dB)。

2) 单个接收机的输入端参数

(1) 接收灵敏度。与常规 SDH 类似，它是指在满足规定误码率要求的条件下，光接收机所需要的最小平均接收光功率。对 WDM 系统而言，其误码率要求为 1×10^{-12} 。接收灵敏度的老化余度规定为 2~3 dB，即在寿命开始并处于规定温度范围下的灵敏度，与寿命终了且处于最坏条件下的灵敏度之差。

(2) 过载功率仍与常规 SDH 类似，指在满足规定误码率要求的条件下，光接收机所能承受的最大接收光功率值。对 WDM 系统而言，其误码率要求也为 1×10^{-12} 。

(3) 接收波长范围指在 R_n 点，光接收机可以正确接收的光波长范围。其应该可以覆盖光放大器增益波长区的整个中心频率部分，一般在 1 530~1 565 nm。

(4) 光信噪比为当接收机误码率为 1×10^{-12} 时，所需要的最小光信噪比。

(5) 光通道代价指光信号在 S_n 点和 R_n 点之间的光通道传输之后，信号波形失真引起的接收机灵敏度下降的数值。

3) 合路信号输出口参数

(1) 总发送功率为经合路后进入光纤的功率 (包含光放大器的 ASE 噪声)。从光纤的安全性考虑，无论复用路数多少，总的输入功率应小于 +17 dBm。

(2) 光信噪比 (OSNR) 为通路内信号功率与噪声功率的比值。光信噪比是一个重要参数，对估算和测量系统的误码性能、实际工程设计和维护有着十分重要的意义。但是光信噪比并不是衡量系统最确切的标准，因为它没有考虑波形失真，在数字系统中 BER 才是最合适的性能参数。

(3) 每通路功率的最大差值指在同一时刻，在给定的光有效带宽下，MPI-S 或 S' 点 (参见图 1-8) 每通路输出光功率的最大值与最小值之间的功率差。该数值与实际应用系统的通路数无关。

4) 合路信号输入口参数

(1) 平均每路输入功率：在 R' 点可测量到的每路最大和最小输入功率的平均输入功率；

(2) 平均总输入功率：在 MPI-R 和 R' 点处合路输入功率最大值和最小值的平均功率；

(3) 每路光信噪比 (OSNR)：当误码率为 1×10^{-12} 时，每路接收机所需要的最小光信噪比；

(4) 各路输出功率的最大差值：在 R' 点的各路输入信号中，同一时刻最大信号与最小信号功率之差。该数值与实际应用系统的通路数无关。

5) 光通道参数

在 WDM 系统中，出现了“子”和“主”两个光通道。我们定义两个光放大器之间为子光通道，主光通道 MPI 是指合、分波器之间的部分，即 MPI-S 和 MPI-R 之间为主

光通道，“主光通道”与“子光通道”的划分配置如图 1-8 所示。为了保证系统性能，特别是纵向兼容性，ITU-T 定义了一些主光通道的参数，包括衰减、色散和反射系数。

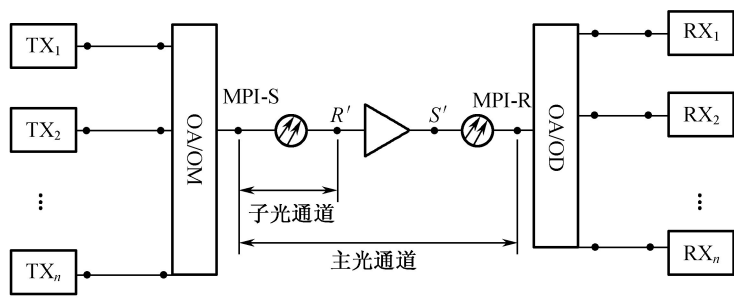


图 1-8 “主光通道”与“子光通道”的划分配置

(1) 衰减与目标距离。目标距离的衰减范围是在 1 530~1 565 nm 掺铒光纤放大器的工作频带内，假设光纤衰减是以 0.28 dB/km 为基础（包括接头和光缆冗余度）而得出的。实际上这个假设对于已经运行的链路比较紧张，对于敷设在地下的老光缆达到这个要求比较困难，因此具体设计时应留有一定的冗余度。有线路放大器系统的衰减范围如表 1.2 所示，33 dB 对应距离为 120 km 的传输目标距离。

表 1.2 有线路放大器系统的衰减范围

应用代码 衰减范围（OA 之间）	NLx-y,z	NLx-y,z
最大	33 dB	33 dB
最小	待研究	待研究

(2) 色散。对于超高速的 WDM 系统，大多是色散敏感系统（包括色度色散和偏振模式色散），因此采用各种色散管理技术，以便超出传统的色散受限距离。表 1.3 所示为 2.5 Gb/s 光放大器系统在 G.652 光缆上的色度色散容限值和目标传送距离。

表 1.3 2.5 Gb/s 光放大器系统在 G.652 光缆上的色度色散容限值和目标传送距离

应用代码	L	V	U	nV _{3-y,2}	nL _{5-y,2}	nV _{5-y,2}	nL _{8-y,2}
最大色散容限值/（ps/nm）	1 600	2 400	3 200	7 200	8 000	12 000	12 800
目标传送距离/km	80	120	160	360	400	600	640

(3) 偏振模式色散。是由光纤随机性双折射引起的，即不同偏振状态下光纤折射率不同，从而导致相移不同，在时域上表现为不同偏振态之间的群时延不同，最终使脉冲波形展宽，增加了码间干扰。由偏振模式色散引起的码间干扰应该包括在允许通道代价中。偏振模式色散不是一种稳态现象，而是随着周围温度和压力条件变化而发生统计地变化，与光纤/光缆的性质有很大关系。

光缆的偏振模式色散应小于 $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

(4) 光通道代价。这里的光通道是指“主光通道”由于反射、码间干扰、模分配噪声、激光器啁啾声等因素的影响，引起脉冲在光纤传输过程中的波形失真，并导致接收

灵敏度明显下降，表现为 BER 曲线向高功率电平偏移。由于光通道代价是接收灵敏度的变化，所以应在误码率为 1×10^{-12} 时测量得出。

对于低色散系统，最大通道代价为 1 dB，对高色散系统，可放宽到 2 dB。

对使用了色散管理技术的系统（如色散补偿光纤技术等），应该基于发送机的未失真信号，光通道代价是定义在两个未失真信号之间的。但有时这些点的接口标准并不与主光通道接口相一致，甚至无法接入，对这种系统光通道代价的定义有待研究。

1.4 DWDM 与 SDH 的关系

1) DWDM 与 SDH 在光网络传送层的关系

DWDM 系统与 SDH 系统均属于传送网层，二者都是建立在光纤传输媒质上的传输手段，在传送网中的关系如图 1-9 所示。

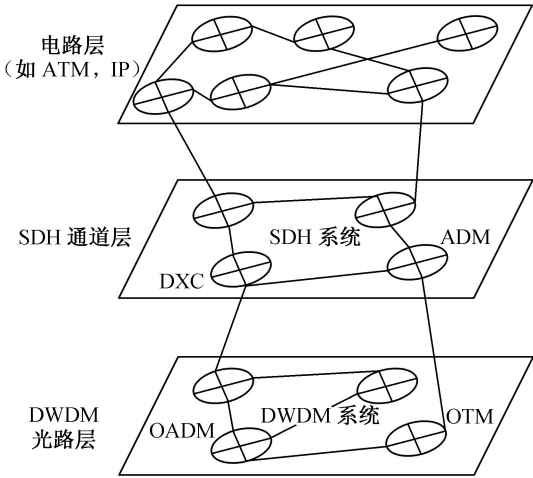


图 1-9 DWDM，SDH 在传送网中的关系

SDH 系统是在电通道层上进行的复用、交叉连接和组网，而 WDM 系统是在光域上进行的复用、交叉和组网。

2) DWDM 与 SDH 对承载信号的复用方式的区别

SDH 是基于单波长（一根光纤传输一个波长光路）的时分复用（TDM）系统，当传输速率超过 10 Gb/s 后，系统色散等不良影响将加重长距离传输的难度。

DWDM 技术在一根光纤中同时传输不同波长的多个光载波信号，充分利用光纤的带宽资源，增加系统的传输容量。

3) DWDM 与 SDH 的承载关系

目前，DWDM 系统的客户层信号多属 SDH 信号，但是由于 DWDM 系统中使用的各波长相互独立，与业务信号的格式无关，因此每个波长可以传输特性完全不同的光信号，实现多种信号的混合传输。

4) DWDM 与 SDH 信号的光接口标准

SDH 设备的光接口符合 ITU-T G.957 和 ITU-T G.691 建议，该标准对工作中心波长没有特别规定。

在 DWDM 系统中，光接口必须满足 ITU-T G.692 建议。该建议规定了每个光通路的参考频率、通路间隔、标称中心频率（中心波长）、中心频率频率偏差等参数。

此外还包括 DWDM 与 SDH 的综合应用。

1.5 承载 SDH 客户层信号的 WDM 分层结构

ITU-T 的 G.872 为光传送网（optical transport network, OTN）的分层结构做了定义。由一系列光网络单元经光纤链路互连而成，并按照 G.872 的要求提供有关客户层信号的传送、复用、选路、管理、监控和生存功能的网络称为光传送网。未来的光传送网是一种基于 DWDM 的全光通信网，这种网络的最初拓扑是一种点到点的网络拓扑，在这种拓扑结构中，承载 SDH 信号的 WDM 系统主要用于实现信息的点到点的大容量传输。OTN 将整个光层细分为光通路（optical channel, OCH）层、光复用段（optical multiplexing section, OMS）层和光传输段（optical transmission section, OTS）层三层，如图 1-10 所示。OCH 层直接与各个数字化的用户信号相连接，它为透明地传送 SDH, PDH, ATM, IP 等业务信号提供点到点的以光通路为基础的组网功能。OCH 指单一波长的传输通路。OMS 为经 DWDM 复用的多波长信号提供组网功能。OTS 经光接口与传输媒质相连接，它提供在光介质上传输光信号的功能。相邻的层网络形成客户/服务者关系，每一层网络为相邻的上一层网络提供传送服务，同时又使用相邻的下一层网络所提供的传送服务。

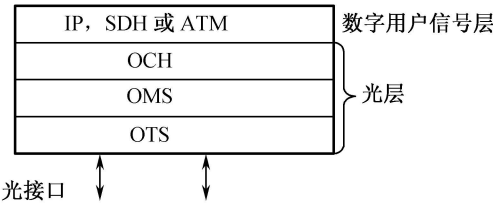


图 1-10 全光网的分层

1) 光通路层

光通路层负责为来自电复用段层不同格式的客户信息选择路由和分配波长；为灵活的网络选路安排光通路连接；为透明地传送各种不同格式的客户层信号的光通路提供端到端的联网功能；处理光通路开销，提供光通路层的检测、管理功能，提供端到端的连接；并在故障发生时，通过重新选路或直接把工作业务切换到预定的保护路由上，以实现保护倒换和网络的恢复。主要传送实体有网络连接、链路连接、子网连接和路径。

光通路层必须具备下述功能：光通路连接和重组，以便实现灵活的网络选路；光通路开销处理，以确保光通路适配信息的完整性；光通路监控功能，以便实现网络等级上的操作和管理；网络的生存能力，以便在故障发生时，通过重新选路来实现保护倒换和网络恢复。

2) 光复用段层

光复用段层保证相邻两个波分复用传输设备间多波长复用光信号的完整传输，为多波长信号提供网络功能。主要包括：为灵活的多波长网络选路重新安排光复用段；为保证多波长光复用段适配信息的完整性，处理光复用段开销；为段层的运行和维护提供光复用段的检测和管理功能。

3) 光传输段层

该层为光信号在不同类型的光传输媒质（如 G.652，G.653，G.655 光纤等）上提供传输功能；光传输段开销处理，以便确保光传输段适配信息的完整性；实现对光放大器或中继器的控制功能等。整个光传送网由最下面的物理媒质层网络所支持，即物理媒质层网络是光传输段的服务者。通常会涉及以下问题：功率均衡问题、EDFA 增益控制问题以及色散的积累和补偿问题。

第 2 章 WDM 系统关键技术

在常规的 WDM 光传输系统中，通常采用掺饵光纤放大器（EDFA）、前向纠错和色散补偿技术来延长传输距离，这些技术在我国长途光缆干线网络上得到广泛应用。目前，随着 IP 业务的发展和宽带业务需求的增长，以 10 Gb/s 为基础的现有长途 WDM 网络已经呈现出“力不从心”的状态，对 40 Gb/s WDM 系统的需求与日俱增。如何解决 40 Gb/s 速率业务的超长距离传输，尽量减少传输过程中 3R 电中继站的数量，则成为传输界关注的焦点。

光纤通信系统的传输距离通常受衰耗和带宽两个因素的限制。WDM 超长距离传输的技术研究包括三个方面：一是减少长距离传输中光信号的衰耗问题；二是对制约带宽的色散进行补偿；三是改进传输码型提高纠错能力。波分复用系统与常规的 PDH，SDH 光纤传输系统不一样，为提高波分复用系统的传输容量和传输距离，涉及许多关键性的技术问题，这些技术的成熟及应用将给光传输领域带来革命性的创新和应用成本的直接下降。本章首先对光纤的传输特性进行分析，其次对目前使用的光纤色散补偿技术、编码技术等进行分析。

2.1 光纤传输特性

2.1.1 光纤的衰减特性

功率传输衰耗是光纤最基本和最重要的参数之一。由于光纤衰耗的存在，光纤中传输的光功率将随传输距离的增加呈指数规律衰减。

1. 光纤衰耗的产生以及低衰耗窗口

光纤衰耗的产生主要包括两个方面：

（1）来自光纤本身的衰耗，包括光纤材料本身的固有吸收衰耗、材料中的杂质吸收衰耗（尤其是残留在光纤内的 OH^- 成分导致的衰耗）、瑞利散射衰耗以及由于光纤结构不完善引起的散射衰耗。

（2）由于光纤经过集束制成光缆，在各种环境下进行光缆敷设、光纤接续以及作为系统的耦合与连接等引起的光纤附加衰耗。包括光纤/光缆的弯曲衰耗、微弯衰耗、光纤线路中的连接衰耗、光器件之间的耦合衰耗等。

光纤的衰减谱如图 2-1 所示。窗口 I 的平均衰耗值为 2 dB/km，窗口 II 的平均衰耗值为 0.3~0.4 dB/km，窗口 III 的平均衰耗值为 0.19~0.25 dB/km，窗口 V 的 1 380 nm 处存在 OH^- 吸收峰。

随着光纤制造工艺的改进，光纤传输衰耗逐年降低，目前已存在 5 个低衰耗窗口，各窗口的划分如图 2-1 所示。

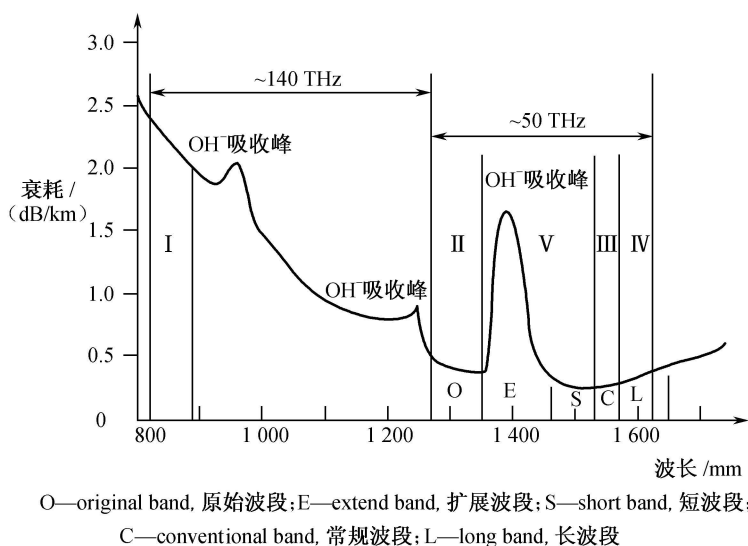


图 2-1 低损耗窗口划分

5 个窗口的光信号的标记、波长范围、使用光纤类型和应用场合，如表 2-1 所示。

表 2-1 低损窗口特性比较

窗 口	I	II	III	IV	V
标记/nm	850	1 310 (O 波段)	1 550 (C 波段)	1 600 (L 波段)	1 360~1 530 (E + S 波段)
波长范围/nm	600~900	1 260~1 360	1 530~1 565	1 565~1 625	1 360~1 530
光纤类型	多模光纤	多模光纤 /G.652/G.653	G.652/G.653/G. 655	G.652/G.653 /G.655	全波光纤
应用场合	短距、低速	短距、低速	长距、高速		

2. 常用光纤的线路损耗

单模光纤损耗值如表 2-2 所示。

表 2-2 单模光纤损耗值

光 纤 类 型	G.652	G.653	G.655
典型损耗值 (1 310 nm) / (dB/km)	0.3~0.4	—	—
典型损耗值 (1 550 nm) / (dB/km)	0.15~0.25	0.19~0.25	0.19~0.25
工作窗口/nm	1 310 和 1 550	1 550	1 550

克服光纤损耗的办法主要有：采用高输出功率的激光器，采用高灵敏度的接收器和光放大器等。

2.1.2 光纤的色散特性

色散是光纤的另一个重要参数。光纤色散引起传输信号的畸变，使通信质量下降，从而限制了通信容量和通信距离。在光纤损耗已大为降低的今天，色散对高速光纤通信

的影响就显得更为突出。降低光纤的色散，对增加通信容量，延长通信距离，发展高速 WDM 通信和其他新型光纤通信技术都是至关重要的。

在物理光学中，色散是指由于某种物理原因使具有不同波长的光经过透明介质后被散开的现象，例如一束白光经三棱镜后分为彩色光带，这是因为玻璃对不同波长（不同频率）的光有不同的折射率，即玻璃的折射率是光波长（光波频率）的函数，从而不同波长的光在玻璃中的传播速度也不相同。

在光纤中，光信号是由很多不同的成分（如不同模式、不同频率）组成的，由于信号的各频率成分或各模式成分的传播速度不同，经过一段距离的光纤传输后，不同成分之间出现时延差，从而引起信号畸变，这种现象称为色散。在数字光纤通信系统中，色散会引起光脉冲展宽，严重时前后脉冲将相互重叠，形成码间干扰，增加误码率，从而影响了光纤的传输带宽，限制了光纤通信系统的传输容量和中继距离。

按照色散产生的原因，光纤的色散主要分为：模式（模间）色散、色度色散和偏振色散。在多模光纤中模式色散占主导地位，它最终限制了多模光纤的带宽；单模光纤只传输一个模式，没有模式色散，因此带宽可以很大，单模光纤中的色散主要包括色度色散和偏振色散。

以下主要介绍色度色散和偏振模色散的现象、原因以及对 DWDM 系统的影响。

1. 色度色散

色度色散包括材料色散和波导色散。

（1）材料色散：由于光纤材料的折射率 n 随光波长 λ 的变化而变化，使光的传播速度随波长而变，从而引起脉冲展宽的现象称为材料色散。

在光纤通信系统中，实际使用的光源发出的光并不是单一波长的光，而是具有一定的谱线宽度。光在其中的传播速度 $v(\lambda) = c/n(\lambda)$ 也是随波长的变化而变化的。当具有一定谱线宽度的光源发出的光脉冲入射到光纤中传输时，不同波长的光脉冲将具有不同的传播速度，在到达出射端面时将产生时延差，从而使脉冲展宽。

（2）波导色散：由光纤的几何结构引起的色散称为波导色散。产生波导色散的原因是由于波导效应引起模内频率高的光信号进入包层，使一部分光在纤芯中传播，另一部分光在包层中传播，而包层折射率小于纤芯折射率，导致信号的传输速度不同，从而产生了色散。

波导色散的大小可以和材料色散系数相比拟。在感兴趣的波长区域内，波导色散 τ_w 均为负值。其幅度由纤芯半径 a 、相对折射率差 Δ 及剖面形状决定。一般地说，纤芯越小， Δ 越大，波导色散也越小。在一定的波长范围内，波导色散与材料色散具有相反的符号。通过改变光纤的折射率分布和剖面结构参数，可以改变波导色散的值，从而在希望的波长上实现材料色散和波导色散的代数和为零。纤芯半径与零色散波长的关系如图 2-2 所示。

目前使用较多的 G.652 光纤最小色散波长 (λ_0) 在 1 310 nm 附近，色散位移光纤 (G.653) 的零色散波长 (λ_0) 在 1 550 nm 附近。随着波长的变化，色散在 λ_0 两边有不同的极性，单模光纤的色散特性如图 2-3 所示。

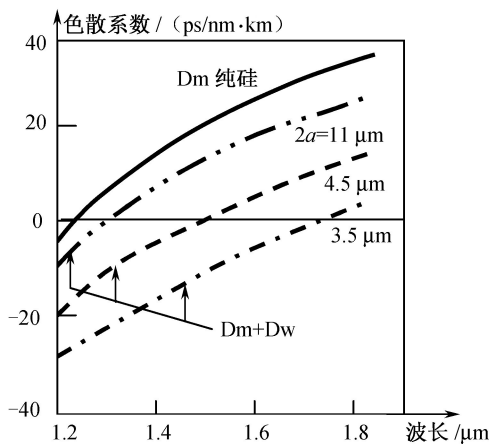


图 2-2 纤芯半径与零色散波长的关系

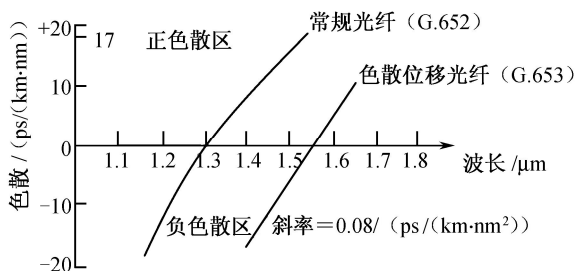


图 2-3 单模光纤的色散特

正色散区：红光（波长较长的光）传得较快。

负色散区：蓝光（波长较短的光）传得较快。

但不管正色散还是负色散都会引起信号脉冲展宽，使波形发生畸变。克服的办法一般有：加色散补偿光纤，自相位调制技术等。

尽管光器件受色散的影响很大，但存在一个可以容忍的最大色散值（即色散容纳值）。只要产生的色散在容限之内，仍可保证正常传输。

2. 偏振模色散（PMD）

偏振色散也称为极化色散。在光纤中，光场的分布形式（模式）既不是简单的横电（TE）模，也不是简单的横磁（TM）模，而是图像更为复杂的混合或者简并模式，统称为线偏振模（linearly polarized, LP）。单模光纤中只传输基模，用 LP_{01} 表示。 LP_{01} 又按场强的偏振方向区分为 LP_{01}^X 和 LP_{01}^Y 两种，X 和 Y 表示在垂直光纤轴线的平面内两个泛指相互垂直方向。

单模光纤中可能同时存在 LP_{01}^X 和 LP_{01}^Y 两种基模，也可能只存在其中一种模式，并且可能由于激励和边界条件的随机变化而出现这两种模式的交替。在理想的圆柱形对称结构的单模光纤中，其横截面应是圆形，横截面的尺寸及折射率分布沿轴线应处处均匀，没有畸变， LP_{01}^X 和 LP_{01}^Y 具有相等的传播常数，因此它们在光纤中传输的群时延相同，不存在时延差，并且极化状态保持不变。然而，实际的光纤总是存在一定的不完善性，如光纤的弯曲、光纤的椭圆度等，而且还经常受到局部应力的扰动，结果导致光纤内部

产生双折射现象，则两个极化正交的 LP_{01}^X 和 LP_{01}^Y 的传播常数不同，即两个模式不再简并，它们沿光纤传输时将产生群时延差，即差分群时延。极化色散指的就是由差分群时延引起的光脉冲展宽现象，单模光纤中的 PMD 现象如图 2-4 所示。

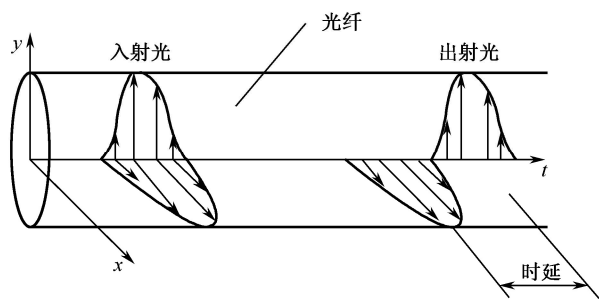


图 2-4 单模光纤中的 PMD 现象

PMD 与其他色散相比，几乎可以忽略，但是无法完全消除，只能从光器件上使之最小化。脉冲宽度越窄的超高速系统中，PMD 的影响越大。

在单模光纤的许多应用中，都要求极化色散很小或者要求输出极化保持恒定，因此必须减小单模光纤的不完善性，尽量减小其椭圆度和内部残余应力，以尽量减小单模光纤中的双折射现象，从而减小极化色散的影响。

2.1.3 光纤的非线性效应

在单信道的光纤通信系统中，对于光纤特性主要考虑的是损耗和色散，它们限制着传输距离和传输容量。

但在 WDM 系统中，每一波长都携带一定的光功率，再加上光纤放大器的应用，注入光纤的光功率较大（14~17 dBm），高光功率会引起光纤的非线性效应，主要包括受激喇曼散射（SRS）、受激布里渊散射（SBS）、自相位调制（SPM）、交叉相位调制（XPM）和四波混频效应（FWM）等，这些非线性的存在对于传输信号会引起附加损耗、信道间串话、信号频率移动等不良影响。

1. 受激喇曼散射（SRS）

受激喇曼散射（stimulated Raman scattering, SRS）可以看做是介质中分子振动对入射光的调制，从而对入射光产生散射作用。当入纤光功率达到一定数值时（如+27 dBm），会引起光纤材料的分子振动，调制入射光强产生了间隔恰好为分子振动频率的边带，低频边带的斯托克斯波强度高于高频边带的反斯托克斯波。

这种效应对波分复用的影响：一是导致各复用通路的信号出现不均衡。当两个恰好分离斯托克斯频率的光波同时入射到光纤时，由于 SRS 的影响低频波将获得增益，高频波将被衰减，造成 WDM 系统中短波长通路产生过大的信号衰减，导致 OSNR 下降，而较长波长的光功率增加，会引起其他非线性效应；二是 SRS 效应将引入串话。受激喇曼散射过程中短波长（高频）信道的光会作为泵浦光将能量转移至长波长信道中，从而引起信道间的串话。SRS 现象如图 2-5 所示。

量子力学的解释为，入射光的光子被介质的分子散射成为另一个低频光子，同时介

质分子完成振动态之间的跃迁，产生的频率下移光称为斯托克斯光。

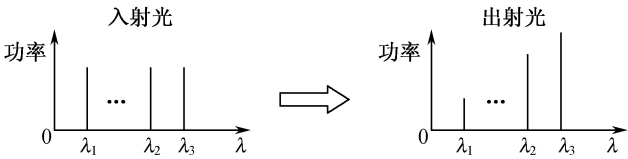


图 2-5 SRS 现象

SRS 效应对通信系统会产生一定的负面影响，但 SRS 效应也有积极性的一面，如利用喇曼增益可以制作分布式喇曼放大器，对光信号提供分布式宽带放大，如中兴通讯公司 WDM 设备的 DRA 板即利用 SRS 效应实现光放大功能。

降低入纤光功率可以防止出现 SRS 效应，此外通过调整放大器的增益曲线、增设光功率均衡站等都可以减小 SRS 效应的影响。

2. 受激布里渊散射（SBS）

受激布里渊散射（stimulated Brillouin scattering, SBS）与受激喇曼散射在物理过程上十分相似，是光纤中泵浦光与声子间相互作用的结果。当入纤光功率很强的时候，入射光将引起光纤介质的晶格振动，从而产生受激散射，入射频率为 ω_p 的泵浦光将一部分能量转移给频率为 ω_s 的斯托克斯波，并发出频率为 Ω 的声波（ $\Omega=\omega_p-\omega_s$ ）。受激布里渊散射产生的斯托克斯波传播方向与泵浦波相反。

在使用窄谱线宽度光源的强度调制系统中，一旦信号光功率超过受激布里渊散射 SBS 的门限时（SBS 的门限较低，对于 1 550 nm 的激光器，一般为 7~8 dBm），将有很强的前向传输信号光转化为后向传输，随着前向传输功率的逐渐饱和，使后向散射功率急剧增加。WDM+EDFA 的系统中，注入到光纤中的功率大于 SBS 的门限值，会产生 SBS 散射，SBS 效应如图 2-6 所示。这样会对通信产生不利影响：（1）消耗了光信号的功率；（2）反向传输的斯托克斯波将反馈给激光器，使其工作不稳定；（3）如果光纤中有两个方向的传输信道，而且两个反向传输信道间的频率差别正好满足布里渊频移，受激布里渊散射过程将引起信道间的串话。

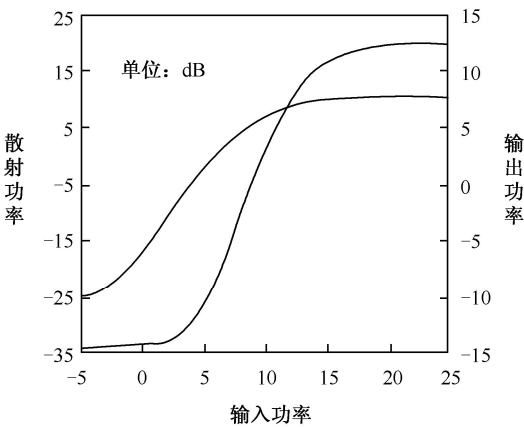


图 2-6 SBS 效应

受激布里渊散射虽然易于发生(阈值功率较低),但与受激喇曼散射过程引起的串话相比较,受激布里渊散射引起的串话较易避免。一是因为受激布里渊过程串话发生的频率范围很窄(约 100 MHz),只有两信道间隔很小时,才发生明显的布里渊串话;二是两信道信号必须在反向传输时才发生 SBS 放大,当所有信道都同向传输时不会产生 SBS 串音。利用 SBS 效应可以制成光纤布里渊激光器和放大器。

SBS 可采用载波抑制或展宽载波光的谱宽来进行抑制。

3. 自相位调制 (SPM)

当功率过大的光信号在光纤中传播时,会使光纤介质发生极化反应,导致光纤的有效折射率发生变化,由于折射率与光强存在依赖关系,在光脉冲持续时间内折射率发生变化,脉冲峰值的相位对于前、后沿来说均产生延迟。随着传输距离的增大,相移不断积累,达到一定距离后显示出相当大的相位调制,从而使光谱展宽并导致脉冲展宽,这种现象称为自相位调制 (self-phase modulation, SPM),如图 2-7 所示。

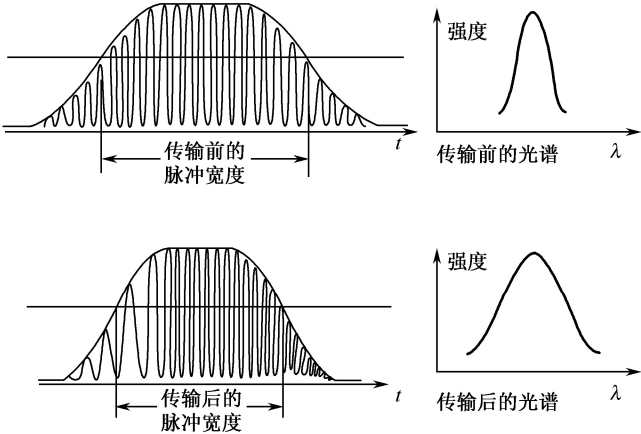


图 2-7 SPM 现象

SPM 使光脉冲发生畸变:在正色散区光脉冲被压缩,在负色散区光脉冲被展宽。因此当系统使用色散系数为负的光纤工作区时(例如 G.653 光纤的短波长区,或工作区色散系数为负的 G.655 光纤),SPM 将导致色散受限距离变短;当使用色散系数为正的光纤工作区时(例如 G.652,G.653 光纤的长波长区,或工作区色散系数为正的 G.655 光纤),SPM 将延长色散受限距离。

SPM 与光信号的强度成正比,因此 SPM 主要发生在靠近发送端的一定距离内,如 20 km。同时,低色散光纤也可减少 SPM 对系统性能的影响。

因为 SPM 是对复用通路本身的光信号产生的附加相位调制,所以它会受信号的比特图形相关性的影响,比特图形的相关性越强,SPM 效应越容易发生。

减小信号的比特图形相关性,可以抑制 SPM 效应。

4. 交叉相位调制 (XPM)

当两个或多个不同频率的光波在非线性介质中同时传输时,每个频率光波的幅度调制都将引起光纤折射率的相应变化,从而使其他频率的光波产生非线性相位调制,即交

叉相位调制（cross-phase modulation, XPM）。

XPM 通常伴随 SPM 产生。XPM 将引起一系列非线性效应，如 WDM 系统通道之间的信号干扰、光纤非线性双折射等现象，造成光纤传输的偏振不稳定性。同时，XPM 对脉冲的波形和频谱也会产生影响。

适当的增大色散可削弱 XPM 的影响。

XPM 与复用通路的间隔成反比，即复用通路的间隔越小，XPM 越严重。因此对于复用通路间隔小于 50 GHz 的 WDM 系统，如 800 Gb/s、1 600 Gb/s 系统，要引起重视。增大复用通路之间的间隔，可以抑制 XPM 的发生。

5. 四波混频（FWM）

四波混频（four wave mixing, FWM）是指两个以上不同波长的光信号在光纤的非线性影响下，除了原始的波长信号外还会产生许多额外的混合成分（或叫边带）信号。图 2-8 所示为两个波长（ f_1, f_2 ）的四波混频，从图上可以清楚地看到由于四波混频产生了两个新的频率成分 $2f_1-f_2$ 和 $2f_2-f_1$ 。 N 个原始波长信号经四波混频将产生 $N^2(N-1)/2$ 个额外的波长信号。

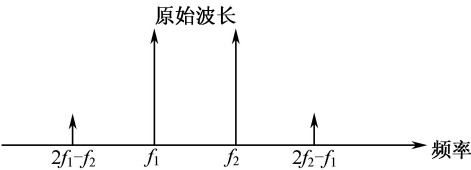


图 2-8 四波混频（FWM）

FWM 对 WDM 系统的影响主要来自两个方面：

- （1）产生新的波长，使原有信号的光能量受到损失，影响系统的信噪比等性能；
- （2）如果产生的新波长与原有某波长相同或交叠，从而产生严重的串扰。

但四波混频的机理及实验都说明光纤的色散越小，四波混频的效率越高，即光纤的色散对四波混频有很好的抑制作用。因此，克服四波混频最有效的方法是采用非零色散光纤或光纤的非零色散窗口。

四波混频的门限功率最低，在 0 dBm 左右，必须足够重视。

考虑到这些因素，在 WDM 系统中为了克服 SBS 和 SRS，建议规定入纤的最大光功率为+17 dBm，尽量低于它们的门限值；由于四波混频的门限太低无法避开，可以利用四波混频与色散的关系来克服。G.653 光纤的 1 550 nm 窗口为零色散窗口，不能对 FWM 抑制，故它不能应用在 WDM 系统中。G.652 光纤设计工作在 1 310 nm 窗口，它在 1 550 nm 窗口有足够的色散，故可以抑制光纤的 FWM 的影响，即支持 DWDM 的应用。但是，G.652 光纤在 1 550 nm 处的色散太大，为 G.655 光纤的 6~7 倍，会引起过大的波形失真，对长距离或高比特率的传输需要进行色散补偿。非零色散位移光纤（non-zero dispersion shift fiber, NZDSF），即 G.655 光纤，在 1 550 nm 窗口的色散为 1~10ps/(nm·km)，既达到对非线性有很好的抑制作用，又小到足以进行长距离的高速传输（2.5 Gb/s 大于 1 000 km，10 Gb/s 大于 360 km，不需要色散补偿），是 WDM 系统的理想之选。

2.2 光纤的色散补偿技术

色散是影响光纤通信传输距离的重要因素之一。绝大多数已敷设的 G.652 光纤在 1 310 nm 波段呈现零色散, 在 1 550 nm 波段具有 $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的色散, 当传输 100 km 后色散可达到 $1 700 \text{ ps}/\text{nm}$ 。在速率较低时, 光纤可以看成是对数据速率无关的传输媒质, 但对高速信道来说, 却不是这样。理论上色散限制定义为理想 WDM 系统承受 1 dB 代价的距离, 对于 2.5 Gb/s 的系统来说, 这个限制为 1 000 km, 但在实际系统中, 接收机时钟恢复系统的非理想性也加剧了色散的影响, 因此, 通常采用一个保守的 600 km 距离作为色散限制。对采用常规光纤的 10 Gb/s 系统来说, 色散限制仅仅为 50 km, 因此, 在长距离光纤段中必须采用某种形式的色散补偿技术。

色散补偿又可称为光均衡, 其基本原理是当光脉冲信号经长距离光纤传输后, 由于色散效应而产生脉冲展宽或畸变, 这时可用一段具有相反色散符号的补偿器件来修正, 目的是消除脉冲展宽或畸变。

当前, 国际上对色散补偿的研究较多, 已经提出的色散补偿方案有: 啁啾光纤光栅 (CFG)、色散补偿光纤 (DCF)、基于 G-T 标准干涉技术、基于 MEMS (微电子机械系统) 技术、PLC 环行共振腔技术等。这些技术各有优、缺点, 据统计, 目前色散补偿器中利用色散补偿光纤 (DCF) 技术的占 89%, 利用啁啾光纤光栅 (CFG) 和基于 G-T 标准干涉等技术的模块占 11%。但随着 40 Gb/s DWDM 的成熟和发展, 要延长传输距离使用动态色散补偿技术是必然的。虽然目前大量使用的色散补偿光纤 (DCF) 技术能够对各个波长进行补偿, 但其单一固定的补偿值不能满足对所有波长色散的精确控制, 不能实现 100% 的斜率补偿。同时 DCF 的插入损耗也是比较大。由于 DCF 技术的这些固有缺陷, 今后能够实现动态补偿技术的模块应用将呈上升趋势, 预计 2009 年后 DCF 技术将占 26%, 光栅、体光学干涉等模块将占 74%。基于体光学干涉的色散补偿方法, 核心元件为 G-T 干涉仪, 具有全方面的色散补偿能力。基于 MEMS 及 PLC 环型共振腔技术的动态色散补偿器集成度高, 并可加入其他功能, 前景十分被看好。随着首个全光子 2R 再生器在美国光纤通信会议 OFC2004 上的亮相, 人们相信基于各种新技术和工艺的动态色散补偿器将会不断涌现。

2.2.1 固定色散补偿

1. 色散补偿光纤

这种色散补偿技术是采用特殊的负色散光纤补偿常规单模光纤的正色散, 使时延接近于一个固定值, 保持光波形不展宽。这种负色散光纤称为色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF)。

色散补偿光纤具有特殊的折射率特性, 如图 2-9 所示。图 2-9 (a) 是早期 DCF 的折射率特性, 光纤纤芯外只有一层简单包层。这种光纤只能在 1 550 nm 得到负色散, 无法补偿其他波道。在纤芯和外包层之间增加一个低折射率层, 就得到 W 型折射率, 如图 2-9 (b) 所示, 这种 DCF 具有负的色散和色散倾斜, 能够用于 WDM 系统, 但是此种 W 型折射率光纤的截止波长相对较小, 弯曲时的损耗较高。为此再增加一个大折射率层, 如图 2-9 (c) 所示, 以改善 DCF 的弯曲特性, 同时也能更灵活地补偿色散和色散倾

斜，减小残余色散。

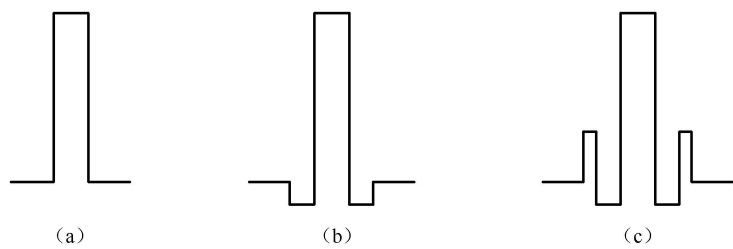


图 2-9 三种典型的色散补偿光纤折射率特性

单模 DCF 在 1 550 nm 光波长附近有较大的负色散，用这种光纤与常规单模光纤（G.652 光纤）串接组成传输线路，可以补偿常规单模光纤在该光波长处的正色散，以延长中继距离。为了获得显著的补偿效果，DCF 与常规单模光纤长度的选择应符合下式要求

$$D(\lambda_s)L + D_c(\lambda_s)L_c = 0 \tag{2-1}$$

式 (2-1) 中， $D(\lambda_s)$ 和 $D_c(\lambda_s)$ 分别为常规单模光纤和 DCF 在工作波长 λ_s 的色散系数； L 和 L_c 分别为常规单模光纤和 DCF 的长度。

通常 DCF 光纤的纤芯直径比标准单模光纤纤芯直径小得多（标准单模光纤 9 μm ，而 DCF 的直径只有 4 μm ），其色散值一般是标准单模光纤的 5~10 倍。要补偿 80 km 的色散需要 16 km 左右的色散补偿光纤，但 DCF 光纤比标准单模光纤衰减大，同时会引入 5~8 dB 的衰减，所以必须附加放大器来进行补偿，DCF 色散补偿传输系统如图 2-10 所示。

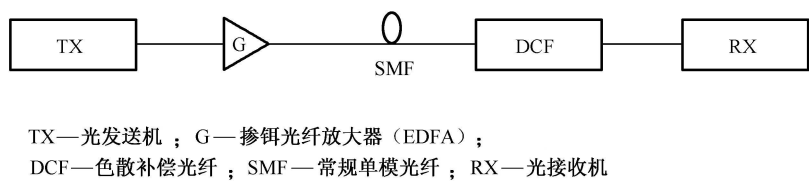


图 2-10 DCF 色散补偿传输系统

DCF 的主要特性是色散特性和传输衰减特性，此外还有 DCF 和常规单模光纤的连接衰减以及 DCF 的弯曲衰减。

对于色散特性，除了 1 550 nm 波长处的色散系数 D_c 外，还包括色散和波长关系曲线的斜率 S_c ，从色散补偿效果来说，要求 DCF 的色散系数越大越好，而要求色散斜率应满足下面的关系式，即

$$\frac{S}{|S_c|} = \frac{D}{|D_c|} \tag{2-2}$$

以便在宽波长范围内，尤其在 1 530~1 560 nm 波长范围内进行有效的色散补偿。在式 (2-2) 中， D 和 S 分别为常规单模光纤的色散系数和色散斜率。

对于传输衰减特性，为了使 DCF 获得较大的负色散，需增加纤芯的相对折射率差，即在纤芯内大量的掺杂会额外地增加散射衰减，因此，DCF 的衰减系数一般较大。采用

DCF 进行色散补偿时, 由于 DCF 的接入会给传输线路带来较大的附加衰耗, 也会影响传输质量。可见, 在选用 DCF 时, 必须兼顾色散系数和衰减系数。

为了直接比较同类型 DCF 的特性, 定义 DCF 的品质因数 (figure of merit, FOM) 为

$$\text{FOM} = \left| \frac{D_c}{\alpha_c} \right| \quad (2-3)$$

式 (2-3) 中, D_c 和 α_c 分别为 DCF 的负色散系数和衰减系数。根据 DCF 品质因数, 可估算出在色散补偿时由于 DCF 的引入使传输线路衰减的增加值, 在满足式 (2-1) 所示的色散补偿条件下, 采用 DCF 色散补偿后线路的平均衰减系数为

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha L + \alpha_c L_c}{L} = \alpha + \frac{D}{\text{FOM}} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 中, α 和 L 分别为常规单模光纤线路的平均衰减系数和长度; D 为常规单模光纤的色散系数。

显然, 在满足色散补偿条件下, 所采用的 DCF 的品质因数越高, 则进行色散补偿后线路的平均衰减系数越小。因此, 利用品质因数这一参数可对不同类型的 DCF 直接进行性能比较。

传统上, 将基于 DCF 的色散补偿模块置于放大器处。放大器通常由两级 EDFA 组成, 最优的方法是将 DCF 放置于两级 EDFA 之间。这样放置有以下几个好处:

(1) 在放大器处可以方便地连接光纤, 无须破坏光缆;

(2) DCF 衰耗高, 所以为了防止得到的信号功率过低, 应该在其经过 DCF 前先进行功率放大;

(3) DCF 的有效面积比常规单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的四分之一还小。非线性程度更高, 应限制其最大注入光功率, 将 DCF 放置于第二级 EDFA 放大器之前, 可以保证注入 DCF 的光功率不会导致过大的非线性效应。而第二级 EDFA 对光信号放大, 可获得合适的光纤注入功率, 而这一功率往往比 DCF 能接受的光功率大得多。

色散补偿光纤的优势在于其带宽大, 能同时对多个 WDM 信道进行色散补偿, 而且是无源全光纤设备。但 DCF 也有自身的缺点:

(1) DCF 色散补偿能力是固定的;

(2) DCF 的有效面积只有 $19 \mu\text{m}^2$, 比标准单模光纤的有效面积 $85 \mu\text{m}^2$ 小得多, 从而导致更大的非线性效应;

(3) 需要的 DCF 光纤的长度长, 达到要补偿的 SMF 长度的 1/5, 从而增加了传输衰耗。

2. 啁啾光纤布拉格光栅

由于光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 衰耗低, 封装尺寸小和光学非线性效应弱, 因此其正在发展成为一种有力的色散补偿技术。在啁啾光纤光栅中, 不同波长的光在光纤光栅上的不同位置满足布拉格条件, 从而可以通过设计啁啾分布, 控制不同的光频分量在光栅中的往返时延, 利用光纤光栅中的传输时延抵消传输光纤的群时延。如图 2-11 所示, 由于群速度色散, 输入到啁啾光纤光栅的光脉冲中的短波长分量群速度高, 经过光纤传输后位于脉冲的前沿, 而长波长分量位于脉冲的后沿, 造成光脉冲展宽。

输入光脉冲经过三端口的环行器后进入啁啾光纤光栅，长波长分量在光栅的起始端就被反射，而短波长分量在光栅的末端才被反射，于是补偿了群速度色散效应，使输出脉冲宽度被压缩，当满足式（2-5）时，输出脉冲的宽度被还原。

$$D_f L_f = \frac{2n_{\text{eff}} L_g}{c \cdot \Delta\lambda} \tag{2-5}$$

式中， D_f 为光纤的色散系数； L_f 和 L_g 分别为光纤跨度和光栅长度； n_{eff} 为光栅的有效折射率； c 为光速； $\Delta\lambda$ 为光栅的使用带宽。当所需要补偿的系统色散量给定时，啁啾光纤光栅长度越长，可补偿带宽就越大。

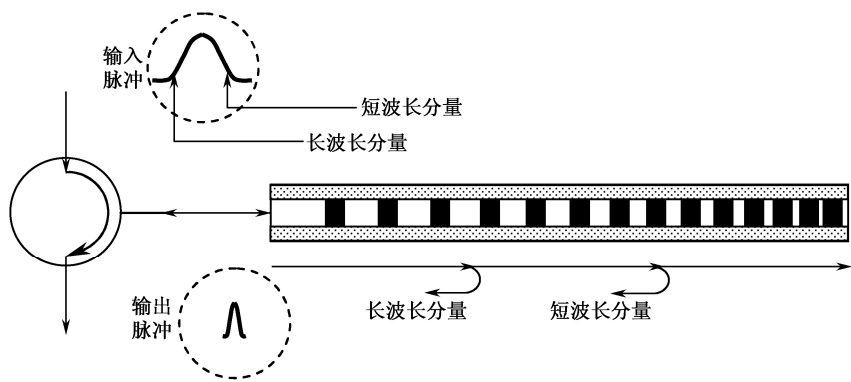


图 2-11 利用啁啾光栅进行色散补偿原理图

3. 超长宽带光栅

如果能够在足够长的光纤上刻写光栅，那么啁啾 FBG 就能在较宽的波长上提供负色散。传统上，由于将光栅重置于写入阶段时累积接合误差会导致大的波动，刻写用于宽带色散补偿的米级长度的光栅是相当困难的。制造大长度、低波动的宽带光纤光栅的技术突破是恒定速度刻写技术的出现，该技术将光纤缠绕在一个大的旋转锭子上，通过大质量锭子的稳定旋转实现对光栅写入的控制。这种技术可以制造出波动小于 20 ps 的米级长度的光纤光栅。

宽带啁啾光栅性能良好，并可以叠加起来用于色散补偿。虽然它们制造困难，但是仍然取得了很大的进展。而低波动、米级长度的光栅已经能为整个 C 波段（比如波长为 1 520~1 560 nm）提供可靠色散补偿解决方案。

4. 采样离散信道光栅

对光栅的折射率曲线进行取样，就能得到采样离散信道光栅。由傅里叶分析可知，在空间域上沿光纤光栅轴向进行取样，会导致频域的周期调制，从而在一些特定频点得到光栅频谱的复制品。如果各频谱复制品的中心频率与 WDM 系统各信道的中心频率重合则可以实现多信道的色散补偿。根据耦合模理论，光栅折射率分布的空间特性决定了光栅光谱的响应，其空间频谱的每一个傅里叶分量决定了反射谱中对应的反射峰。啁啾光纤光栅在周期为 P 、取样率 $r = \frac{1}{P}$ 的矩形取样函数调制下，其反射谱上会出现周期性的反射峰，反射峰之间的间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{2n_{\text{eff}}P} \quad (2-6)$$

式中, λ_B 为布拉格波长; P 为取样函数周期。适当选取取样周期 P , 使得反射峰之间的间隔等于光信号信道间隔, 就能实现多信道同时进行色散补偿。

这种技术有两个优点: 可以将取样光栅写入较短的一段光纤中; 各补偿通带的间隔可由采样周期精确保证。然而, 取样光栅提供补偿方案局限于信道之间具有统一的间隔, 如 100 GHz。

当然, 取样啁啾光纤光栅也有自身的缺点, 主表现在: 反射率随信道数增加而降低, 在系统中表现为信道数多时插入损耗过大; 如果不经特殊处理, 该技术不能实现色散斜率的补偿。

5. 高阶模色散补偿光栅

设计常规 DCF 的主要困难在于光纤的有效面积必须做得很小, 否则得不到较高的负色散, 而且较小的有效面积又会引入较高的非线性和高损耗。一种能同时减小非线性和损耗的方法是使用高阶模 (higher order mode, HOM) 光纤, 它在功能上和 DCF 有着很多相似之处, 并可以在连续波长带宽上工作。在高阶模色散补偿光纤光栅中, 光纤波导被设计成能够传输位于截止波长附近的 LP_{11} 或 LP_{02} 模, 而不能传输 LP_{01} 模。基本原理是利用高阶模式在截止波长附近的高色散特性, 从而能够在一段较短的 HOM 光纤上得到所需数量的色散补偿值。

高阶模色散补偿模块 (higher order mode dispersion compensation module, HOM-DCM) 是利用模式变换原理工作的。高阶模色散补偿模块由两个模式变换器和一段 HOM 光纤组成。HOM 光纤长度约为数百米, 它工作于 LP_{02} 模式, 并且位于两个模式变换器之间。第一个模式变换器将传输光纤中的 LP_{01} 模转换成 HOM 光纤支持的 LP_{02} 模, 然后利用 HOM 光纤的负色散特性对光脉冲的色散进行补偿, 在输出端由第二个模式变换器将该 LP_{02} 模转换成传输光纤支持的 LP_{01} 模。在色散补偿模块中, 模式转换器的转换效率是一项非常重要的指标, 目前模式变换器的切换损耗可以控制在 1 dB 以内。

HOM-DCM 通过改变 LP_{02} 模的截止波长或者 HOM 光纤的长度来改变其补偿能力, 可以在整个波长范围内对传输光纤的色散和色散斜率同时补偿, 以解决传输光纤和 DCF 之间的色散斜率失配问题。另外, 由于 HOM 光纤的截止波长要大于常规单模光纤, 并且由光纤单模传输条件可知, HOM 光纤的有效面积要比常规 DCF 的大, 因此 HOM-DCM 中的非线性效应的影响可以被降低。同时, HOM 光纤具有比常规 DCF 更大的负色散参量, 其单位长度上的色散是 DCF 的 6 倍, 即 HOM 光纤的长度只有 DCF 的 1/6。虽然 HOM 光纤单位长度上的损耗比 DCF 大, 但就整体而言, HOM 光纤引入的衰减要比 DCF 小得多。

高阶模色散补偿光纤有效面积大、长度短, 引入的累积非线性效应小、插入损耗低, 从而有利于改善整个光路的信噪比和光功率预算。因此, 高阶模色散补偿技术非常适用于超长距离的传输。综合起来, 高阶模色散补偿技术具有以下优点:

(1) 对系统完全透明, 便于集成到网络基础设施中;

(2) 适应于不同类型的光纤 (SMF, NZDSF) 传输, 且能够满足不同补偿距离的要求;

- (3) 既适用于超高速单波长系统，也适用于多波长系统；
- (4) 能够提供连续宽带色散补偿，不存在逐一波长通道补偿带来的复杂、代价高的问题，最多能同时补偿 C 和 L 波段 100 个波长的系统；
- (5) 高阶模色散补偿光纤具有插入损耗低、不会引入额外的非线性效应等优点。

2.2.2 可调色散补偿

过去，光纤中的色度色散被认为是时不变的，系统一旦配置好，就能稳定运行。甚至当信号速率小于 2.5 Gb/s 时，也不需要色散补偿。对于不需要精确补偿或动态路由的情况，进行固定和（或）粗补偿就足够了。早期的 2.5 Gb/s 的 WDM 系统包含的信道数少，除非出现严重的网络故障，否则网络运行状况保持不变。但是，随着速率的提高、信道数的增多，系统对一些参数的微小变化较为敏感，比如 40 Gb/s 系统的色散容限只有 10 Gb/s 系统的 1/16，以致过去看来是无足轻重的因素现在变得越来越重要，因此必须采取相应的措施来保证系统的正常运行。另外，随着网络发展到可以动态重构，路由的变化必然导致链路残余色散值的变化。再者，一些时变因素，如器件老化、环境变化，都会对系统的性能造成一定的影响。所以，需要在光网络或系统中进行动态或自适应色散补偿。

总之，超长传输系统需要引入可调色散补偿技术的原因有如下几方面。

1) 系统设计的模块化

对于一个静态的网络，两个色散补偿站点之间的实际光纤长度、业务流量都有可能发生变化，从而导致积累的色散会在一个预先设定值处上下波动，为此，设备提供商必须库存大量不同的色散补偿模块，以满足补偿不同积累色散的需要。如果色散补偿模块可以调节以得到想要的色散，那么就可以大大减少库存，同时也使系统的模块化程度大大提高。

2) 对信号速度大于 40 Gb/s 的系统进行精确补偿

随着速率的提高，对色散补偿精确性的要求也大大提高。在 10 Gb/s 部分补偿链路系统中，残余色散容限约为 1 000 ps/nm，但对于 40 Gb/s，则锐减至 60 ps/nm。显然，要提供非常精确的补偿，也需要可调的色散模块；否则，每个跨段的残余色散只会越积越多。

3) 光路的变化

在一个动态重构的光网络中，由于流量阻塞或区段光纤故障以及业务的重新配置，光信号会进行重构路由或改变上下路的结点。其传输距离和经过的光纤类型可能发生变化，从而会产生不同的累积色散。位于接收机处的色散补偿单元必须顺应这些变化，产生相应大小的负色散，以进行精确的补偿。

4) 环境的影响

由于温度的变化，导致光纤中的色散也随之变化，可能对系统产生严重的影响。光纤中的零色散波长以 $0.03 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的规律随温度变化，如图 2-12 所示。图 2-12 中所示的是一个常规单模光纤 $d\lambda_0/dT \approx 0.03 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的例子，相对色散变化正比于光纤斜率大小和温度变化。如果温度变化 $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ ，传输距离 $L = 500 \text{ km}$ ，设 SMF 色散斜率为

0.08 ps/(nm²·km), 那么由于温度变化导致光纤的色散变化 $\Delta D=30$ ps/nm, 相当于 2 km 的单模光纤或 7.5 km 的非零色散位移光纤(NZDSF)上积累的色散。这一数值对于 10 Gb/s 的系统影响不严重, 但对于 40 Gb/s 的系统就是一个严重的影响。

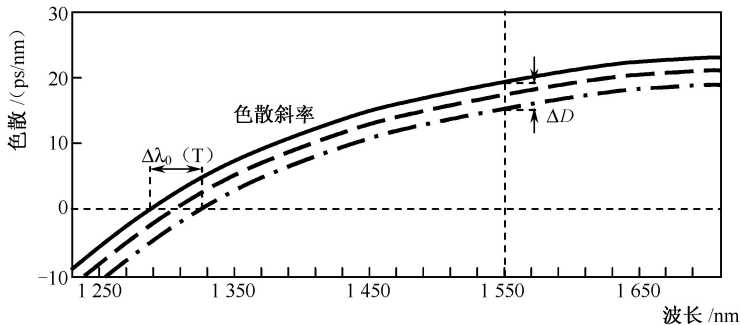


图 2-12 色散随温度的变化曲线

虚拟成像相位阵列 (virtual image phase array, VIPA) 就是一种可调的色散补偿器件, 主要是利用光信号的角度色散特性进行色散补偿调整的, 其工作原理如图 2-13 所示。

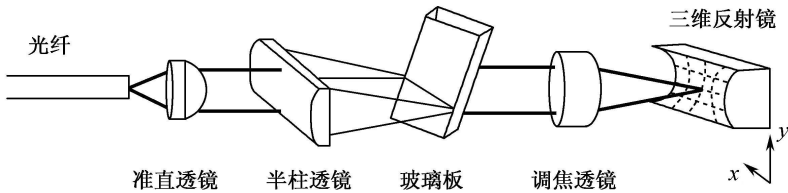


图 2-13 虚拟成像相位阵列结构图

光信号从光纤端面出射后, 经准直透镜、半柱面透镜会聚到镜面玻璃板上。镜面玻璃板前表面上除留有一个小入射窗口外, 其余部分都镀上 100%反射率的反射膜, 后表面镀反射率大于 95%的高反膜, 从而光束在入射到玻璃板后在其中多次反射。透射出来的光束通过调焦透镜, 在三维反射镜上反射到并沿原路返回, 从而使得各个不同波长光的相对延迟增大一倍。镜面玻璃板是产生角度色散的关键元件, 其透射函数可写为:

$$T=\frac{|E_{out}|}{|E_{in}|}=\frac{tt^*}{1+rr^*-2r\cos(2\Delta)}\tag{2-7}$$

式 (2-7) 中, t 和 r 分别为高反膜的透射率和反射率, $2\Delta=\frac{4\pi nd\cos\theta}{\lambda}$ 为光信号在镜面玻璃板中以角度 θ 入射时往返一周的光程。从透射函数的表达式中, 可以得出以下结论: 透射函数极大值出现在 $2\Delta=(2m+1)\pi$ 处, 不同波长的光会在不同角度出现极大值, 这样角度色散将光信号分离开。在镜面玻璃板后, 由调焦透镜和反射镜面组成回路系统, 使得不同波长的光按不同的路径返回。由于波长较短的光色散角度偏大, 光程长; 而波长较长的光色散角度偏小, 光程短。这样, 正好补偿常规光纤的正色散。

利用虚拟成像相位阵列进行色散补偿的特点在于可调范围大, 基本不受带宽限制。实验数据表明, 调节 VIPA 中光回路系统的长度, 色散值可在 -2 000 ~ +2 000 ps/nm 范

围内连续变化,可同时补偿 WDM 系统信道间隔 100 GHz 的光信道 60 个,理论上插入损耗仅 5 dB。因此,根据实际情况,只需调节回路系统中三维反射镜距离调焦透镜的位置,就能灵活地改变虚拟成像相位阵列的色散补偿量。

2.2.3 色散斜率补偿

当仅对单个信道进行补偿时,补偿器的目标只是提供和传输光纤中大小相等、符号相反的色散值。然而,多信道色散补偿面临的困难要艰巨得多。因为光纤中的色散随波长的变化而变化,能够补偿单个 WDM 信道并不能确保所有 WDM 信道都被精确补偿。除非补偿器件和传输光纤色散曲线的频谱斜率相匹配,否则在其他 WDM 信道上会产生残余色散,如图 2-14 所示。图中 λ_2 得到了充分补偿,但 λ_1 和 λ_3 ,则由于 SMF 斜率和 DCF 失配,从而累积残余色散。传统 DCF 的色散斜率很难和传输光纤相匹配,如果为中心信道做到了精确补偿,但是在较短波长信道上会产生正的残余色散,而在较长波长信道上将产生负的残余色散。

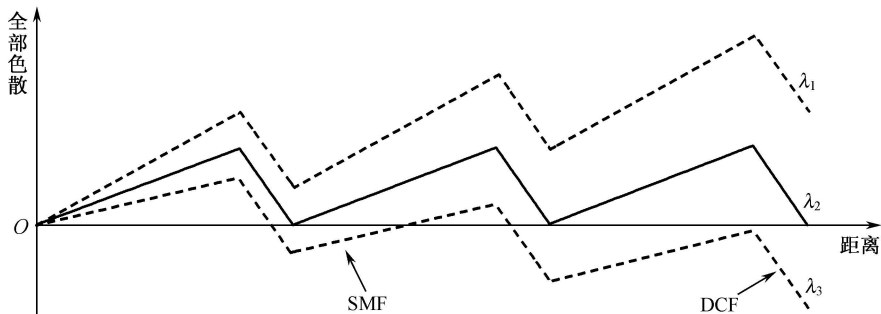


图 2-14 由于色散斜率失配而不能同时对多个信道精确补偿

由此看来,对于高速率、大容量的超长传输系统需要色散斜率补偿,在某些情况下甚至还需要可调色散斜率补偿。在高性能的 WDM 系统中,首先就是要将补偿模块和光纤的色散斜率进行精确地匹配,而对于某一给定的光纤链路,其色散会随环境而变化,不可能准确地判知其值;其次,只使用固定色散斜率补偿会降低系统的模块化程度,同时加大了设备上的库存管理难度;再次,在可重构光网络中,色散斜率会随传输链路的不同而变化。因此,使补偿色散斜率与传输光纤相匹配是非常重要的。

1. 基于 DCF 的固定斜率补偿

光纤制造商在制造 DCF 时,遇到的一个关键问题是使其相对色散斜率(色散斜率除以色散)等于传输光纤的相对色散斜率。尤其是对 NZDSF,其相对色散斜率很大,从而难以进行斜率补偿,几种 NZDSF 光纤的色散参数如表 2-3 所示。不过目前已经制造出了色散斜率接近匹配传统传输光纤的 DCF,在 1 550 nm 处,其相对色散斜率的取值范围为 $0.003\sim0.02\text{ nm}^{-1}$ 。

表 2-3 几种 NZDSF 光纤的色散参数

色散参数 光纤类型	色散系数/ (ps/(nm·km))	色散斜率/ (ps/(nm ² ·km))	相对色散斜率/ nm ⁻¹
SMF	18	0.056	0.003
Tera Light™	8.0	0.058	0.007
TW-RS	3.5	0.045	0.013
LEAF	4.0	0.083	0.021

2. 用于固定斜率补偿的 FBG

由于能够对传输光纤的色散进行精确的补偿，宽带光纤布拉格光栅已经被广泛用于斜率补偿。使用 DCF 和 FBG 的斜率补偿器如图 2-15 所示，在这种解决方案中，同时使用了 DCF 和 FBG，所有的 WDM 信道都经过环形器传输，通过 DCF 环，然后通过一系列刻在 DCF 上的 FBG 段。在这种结构中，不同的 WDM 信道在不同位置处的 FBG 上发生反射，从而得到不同的色散补偿。对于给定的色散斜率，可以通过准确地计算 FBG 的分布来进行补偿。

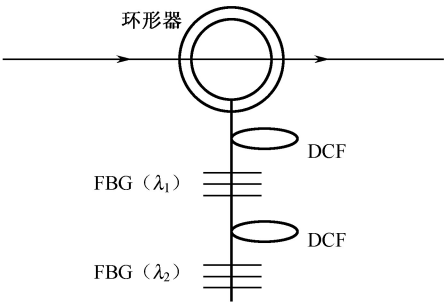


图 2-15 使用 DCF 和 FBG 的斜率补偿器

3. 虚拟成像相位阵列（VIPA）斜率匹配

VIPA 能实现固定色散斜率和可调色散斜率的补偿，即利用光学器件让不同波长的光传输路径长度不一样，从而达到色散补偿的目的。

VIPA 技术通过控制三维反射镜面不同位置的凸、凹，使不同波长的光在不同位置得到反射，得到负的或正的色散，从而可以进行宽带补偿以及色散斜率补偿。VIPA 的关键是三维反射镜的制作和封装技术。

美国和日本的一些公司早在 1998 年就进行了 VIPA 的研究，在众多色散补偿技术中，只有 VIPA 技术可以实现宽带补偿并且可调谐，这也是 VIPA 技术被看好的原因之一。目前这两家公司就 VIPA 器件的标准进行了探讨，如器件的尺寸、固定色散的大小，可调谐的范围等。用于 40 Gb/s 系统的 VIPA 器件即将面市。

4. 基于 FBG 的可调斜率补偿

非线性啁啾光纤光栅（non-linear fiber Bragg grating, NL-FBG）可以为不同的波长提供不同的色散补偿量。宽带 NL-FBG 可以对 WDM 系统进行补偿。通过对啁啾轮廓的

设计，还可以对传输光纤实现精确的可调色散斜率匹配。

对于基于 NL-FBG 的斜率失配问题，可以采用以下两种方法进行解决：

(1) 如果使用取样光栅，单信道色散补偿在傅里叶波长域复制多次，可以补偿多个 WDM 信道。如果 WDM 信道间隔等于频谱复制的间隔，那么各个信道得到的色散补偿相同。但是，如果设计 NL-FBG 使各频谱复制的间隔不同于 WDM 信道间隔，那么各个 WDM 信道得到的色散补偿就会不同，可调色散补偿可以通过正确地设计得到。这种方法的关键特征在于如果光栅啁啾包含了一些高阶色散项，则可以调节斜率补偿值。

(2) 实现斜率匹配是基于非均匀取样光栅的，如果沿光栅的取样率不是恒定的，而是有啁啾的，那么各个重复频谱分量的波形和幅度会略微不同。如果进行适当设计，可以得到色散斜率补偿，但是非均匀取样光栅会导致各信道带宽不一致。

2.3 前向纠错编码技术

前向纠错 (FEC) 是指信号在被传输之前预先利用软件技术 (也需要硬件配合) 在发送端对信源信息进行编码，在接收端则按规定的算法进行解码以达到找出错码并纠错的目的。在光传输系统中采用 FEC 技术，能够消除系统性能曲线中的误码率平台现象，其编码增益也为系统提供了一定的富余量，从而降低光链路中线性及非线性因素对系统性能的影响，同时对于有光放大器的系统，可以增加光放大器间隔，延长传输距离，提高信道速率，减小单通路光功率。用于 WDM 系统时可以降低对 OSNR 的要求。前向纠错本来是针对 2.5 Gb/s 海缆系统的 (G.975 进行了规范)，后来扩展到陆缆系统，如 10 Gb/s 与以 10 Gb/s 为基群的 WDM 系统 (G.709 进行了规范)。

2.3.1 误码纠错方法

1. 误码类型

光脉冲信号在光纤传输的过程中，会受到各种不利因素的劣化影响，这些不利因素有系统外部的也有系统内部的。外部的有干扰信号，内部的有衰耗、色散与噪声 (热噪声、APD 倍增噪声、EDFA 的 ASE 噪声等)。它们会使信号的传输质量下降，如接收端光功率值减小、光脉冲发生畸变、光信噪比降低等，导致接收端出现误码，从而减小了系统传输距离。

从误码的性质看，可以分为两大类：一是随机性误码；二是突发性误码。

在随机性误码中，误码是随机出现的，即前、后发生的误码彼此之间没有任何关系，或者说它们是统计独立的。而在突发性误码中，误码则是成群出现的，呈突发性，如在某短暂的时间间隔内可能会出现大量的误码，而在另一些时间间隔内可能根本不会出现误码。

2. 误码纠错方法

为了减小各种不利因素的影响，提高系统的传输距离，通常可采用三种误码控制措施：一是自动请求重发 (ARQ)；二是前向纠错 (FEC)；三是混合纠错 (HEC)。

1) 自动请求重发 (ARQ)

所谓自动请求重发，是指当接收端发现误码时，通过反馈信道要求发送端重新发送一次，直至正确接收为止。自动请求重发的缺点是需要反馈信道。ARQ 的工作原理示意图如图 2-16 所示。

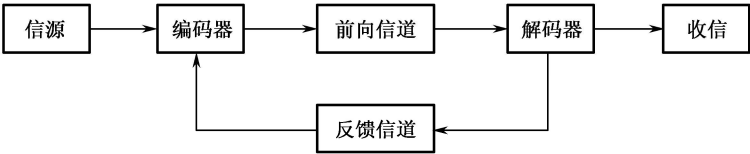


图 2-16 ARQ 的工作原理示意图

2) 前向纠错 (FEC)

所谓 FEC (Forward Error Correction)，是指在发送端利用软件对信源进行一定形式的编码如汉明码、BCH 编码、R-S 编码等，把编码后的冗余校验码、原信息码组成新的码流并进行传输，在接收端利用这些冗余校验码进行纠错，恢复原发送序列，以此达到降低误码率的目的。

FEC 的示意图如图 2-17 所示。

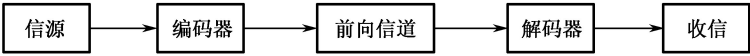


图 2-17 FEC 的示意图

前向纠错的优点是不需要反馈信息，实时性好，编码增益高，不仅适用于点对点的应⽤，而且适用于点对多点的应⽤；前向纠错的缺点是编、解码比较复杂。

前向纠错在高传输速率系统获得了广泛应⽤。

3) 混合纠错 (HEC)

所谓 HEC (hybrid error correction)，是指把 ARQ 与 FEC 结合起来的一种强力纠错方法。少量误码通过 FEC 解决，数量较大的误码则通过 ARQ 解决。

HEC 的示意图如图 2-18 所示。

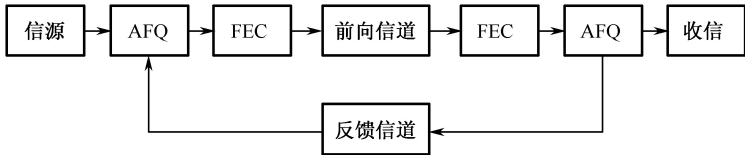


图 2-18 HEC 的示意图

2.3.2 FEC 编码方式

FEC 有三种编码方式，即带内 FEC、带外 FEC 与并行 FEC。

1. 带内 FEC

所谓带内 FEC，是指把信源编码后的冗余校验码存放于 SDH 帧结构的内部，即段开销中某些尚未使用的字节。

带内 FEC 的优点是不改变 SDH 的传输速率，成本低。带内 FEC 的缺点，一是编码增益不高，仅为 2~3 dB，因为可供使用的 SDH 开销保留字节数量有限；二是解码延时比较大。

总之，若对编码增益要求不高，不想对现有系统做较大调整，可选择带内 FEC 方案。

2. 带外 FEC

所谓带外 FEC，是指把信源编码后的冗余校验码放在 SDH 帧结构的外部，然后把冗余校验码与信息码组合在一起形成新的帧信号进行传输。

带外 FEC 通常采用 R-S (m, n) 编码。ITU-T G.975/G.709 标准支持带外 FEC，因为可以存放更多的冗余纠错码，所以其编码增益较高，如 R-S (255, 239) 编码的增益可达 3~5 dB。并且可方便的插入 FEC 冗余码而不受 SDH 帧格式的限制，具有较强的灵活性。因此，WDM 超长距传输系统均采用带外 FEC 编码技术。

带外 FEC 的缺点是技术比较复杂，而且还增加了系统的传输速率（为原速率的 m/n 倍），如对 10 Gb/s 信号进行 R-S (255, 239) 编码后，其传输速率变为 10.67 Gb/s；此外，带外 FEC 还劣化了信号的抖动性能。

3. 并行 FEC

所谓并行 FEC，就是利用 WDM 系统的某个波长专门传输冗余校验码序列。

并行 FEC 的优点，一是具有较强的纠错能力，因为一个波长可以传输大量的冗余校验码；二是解码延时比带内 FEC 小。

目前，FEC 技术主要用于 WDM 系统的长距离传输。因为受非线性效应的制约，WDM 系统的入纤光功率不能过大（如不能超过 +23 dBm），所以当系统的复用通道数很多时（如 40 或 80 个），分配给每个复用通道的发送光功率并不高，难以实现长距离或超长距离传输，虽然通过在中间局站设置 EDFA 可以增加系统的传输距离，但因 EDFA 的噪声系数比较大，加上 ASE 噪声的累积效应，过多的 EDFA 级联使用会导致接收端的 OSNR 过低而达不到要求。采用 FEC 技术可以大大缓解这方面的问题。由于 FEC 具有纠错功能，可以纠正由于接收端 OSNR 过低而出现的误码，即降低了接收端 OSNR 的容限。如一个以 10 Gb/s 为基群的 WDM 系统，通过计算发现其接收端的 OSNR 为 23 dB，这显然不符合接收端 $OSNR \geq 26$ dB 的指标要求。为此可采用带外 FEC 的 R-S (255, 239) 编码予以解决，若可获得 5 dB 的编码增益，则接收端的 OSNR 只要大于 21 dB 即可。

需要说明两点：第一，FEC 技术的作用是降低接收端对 OSNR 的要求，而不是提高了接收端的 OSNR。因为 FEC 技术主要是通过电层对信源编、解码处理，对发生的误码进行纠错，以降低系统的误码率。它既没有增加复用通路的发送光功率，也没有减少系统中的噪声，所以并没有提高接收端的 OSNR；第二，FEC 技术只能改善由噪声频谱为常数的白噪声产生的误码性能，如热噪声、ASE 噪声等，它并不能改善 PMD、色度色散、APD 倍增噪声等对系统性能的劣化影响。

2.4 RZ 编码调制技术

传统的光纤通信技术，在发送端采用开关键控 OOK (On-Off-Keying) 调制方式，即用光脉冲的“有”与“无”分别表示业务信息的“1”与“0”，在接收端则采用直接检测方式，即通过对接收光脉冲的幅度判决来确定收到的是“1”码还是“0”码，这就是所谓强度调制-直接检测 IM-DD，它构成了经典的光纤通信技术基础。

伴随着传输速率的不断提高与传输距离的大幅度增长，使光纤的传输出现了一些新的问题，这些问题单单依靠传统的 IM-DD 技术是无能为力的，必须采用新的调制技术与检测技术来解决，尤其是调制技术。在超宽频带、超长距离的 WDM 传输系统中，使用 NRZ, RZ 等码型在改善光信号的传输性能方面都有各自突出的一面。NRZ 码的应用简单、成本低、频谱效率高，是目前 SDH 和 WDM 系统中应用最为广泛的码型。但由于 NRZ 码元过渡不归零，对传输损伤敏感，不适用于高速超长距离光信号的传输。而 RZ 码的主要缺点是其信号频谱宽度相对 NRZ 码的增加，增加调制器使系统变得复杂、成本高。

为了进一步提高 RZ 码的传输性能，近年来还出现了 CS-RZ (载频抑制 RZ) 和 CRZ (啁啾 RZ) 等码型。在 CS-RZ 码中，相邻码元电场振幅的符号相反，从而达到降低光谱宽度的目的，在功率较高的情况下，不但增加了色散容限，而且有更强的抵抗 SPM 和 FWM 等光纤非线性效应的能力。CRZ 码采用了三级调制技术 (RZ 幅度调制、相位调制和数据调制)，其相位调制器在发射端对 RZ 脉冲的上升沿和下降沿上加入一定的啁啾量，则抵抗非线性效应的能力非常优异。此外，CRZ 还具有优良的抵抗偏振相关衰减 (PDL) 和偏振模色散 (PMD) 的能力，具有更高的传输稳定性。它的缺点是调制技术比较复杂，对三级调制之间的定时和时延要求很高。

信号调制格式是实现大容量 WDM 系统传输的一项重要技术。目前部分超长距离 10 Gb/s 的 WDM 系统已采用了 RZ 编码。40 Gb/s 的 WDM 系统由于其非线性效应及色散 (包括 PMD) 等原因使得信号调制格式的使用受到限制，在调制方式的选择上目前仍未达成统一定论。

采用 RZ 编码已经被业界认为是解决问题的重要技术，但在 RZ 编码中的 CRZ 方式具有脉冲压缩能力，能容忍更高的 PMD 值，可以缓解信号在光纤中的非线性交互作用等优异特点，越来越成为业内关注的重点。

2.4.1 NRZ 与 RZ 码简介

在 SDH 与 WDM 系统中，过去一直采用非归零码 NRZ 作为线路码型，这是因为它具有实现简单、技术成熟、频谱效率高等优点，所以被广泛地用于中、低容量的 SDH 与 WDM 系统。

但伴随传输速率的提高与传输距离的增长，许多本来在中低速率、中短距离应用中可以被忽略的因素影响却变得越来越明显，如 OSNR 受限问题、PMD 影响与非线性效应限制等，它们严重地制约了传输速率的提升与传输距离的增加。

相对于 NRZ 码，RZ 码具有可以降低 OSNR 容限、弱化 PMD 效应、抑制非线性效应等优点，所以更适用于高速率、长距离的传输。

所谓非归零码 NRZ (Non-Return to Zero)，是指光脉冲的“1”码在本时隙内并不回归到零位，或者说“1”码的高功率光电平占满了整个时隙宽度，为全占空比。

所谓归零码 RZ (Return to Zero)，则是指光脉冲的“1”码在本时隙内必须回归到零位，或者说“1”码的高功率光电平只占整个码元宽度的一部分，即占空比小于 100%。

普通 NRZ 码与 RZ 码的示意图如图 2-19 所示，图中 RZ 码的占空比为 50%。

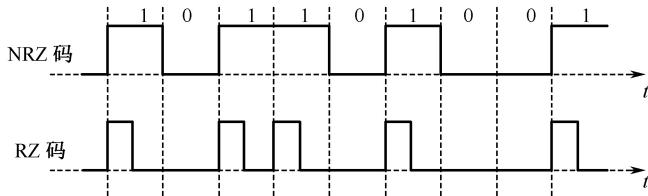


图 2-19 NRZ 码与 RZ 码

2.4.2 RZ 编码调制技术简介

所谓 RZ 编码调制技术，就是针对高速率系统进行长距离传输所出现的问题，主要在发送端采用不同于传统的调制技术（有的也需要在接收端采用新的检测技术），以达到降低 OSNR 容限、弱化 PMD 影响、抑制非线性效应的目的。

RZ 编码调制技术有 CRZ, CS-RZ, Super-CRZ, Super-DRZ, ODB, DPSK, DQPSK 等。

1. 啁啾归零码 CRZ

CRZ (chirped RZ) 调制技术采用三级调制，即幅度调制、相位调制与数据调制。进行相位调制时，在 RZ 光脉冲的上升沿与下降沿分别加入了一定的预啁啾量，预啁啾与 SPM 效应所产生的啁啾符号相反，所以抵抗 SPM 效应的能力相当优越。这种预啁啾还可以减少光纤线路上的剩余色散积累与改善色散补偿适配的问题，已成功用于 9 000 km 的越洋超长传输。

CRZ 码型调制技术的缺点是调制技术非常复杂，它不仅需要三级调制，而且对三级调制之间的定时与时延要求很高，色散补偿时也需要分别对各波长进行精细的色散补偿等。

因此，对于陆地的超长传输来讲，CRZ 码技术的成本过于昂贵。

2. Super-CRZ

超级啁啾归零码 Super-CRZ (Chirped RZ) 技术是用于通路间隔 50 GHz, $N \times 10$ Gb/s WDM 系统（如 C 波段 800 Gb/s WDM 系统）的 RZ 编码调制技术，它基本保留了 CRZ 技术的优点。但 Super-CRZ 技术的实现比较简单，可靠性也非常高，成本却大大降低。

Super-CRZ 技术采用两级调制，第一级产生时钟脉冲，第二级进行相位调制即预啁啾，也就是在 RZ 光脉冲的上升沿与下降沿分别加入了一定的预啁啾，以抵消 SPM 效应所产生的啁啾效应。Super-CRZ 调制技术如图 2-20 所示。



图 2-20 Super-CRZ 调制技术

Super-CRZ 技术包括以下几方面的特点。

1) 低 OSNR 容限

Super-CRZ 码的占空比为 33%，所以能更好地显示出 RZ 码的优越性。同 NRZ 编码相比，理论上 Super-CRZ 可降低 OSNR 容限约 3 dB。

2) 提高了非线性效应容限

独特的相位调制可以获得更宽的谱宽，10 Gb/s 信号 Super-CRZ 码的谱宽为 30~40 GHz，是普通 NRZ 码谱宽（约 20 GHz）的 1.5~2 倍，更宽的谱宽可以降低信号的光功率谱密度，所以可有效地抑制非线性效应的产生，而且对 PMD 效应具有一定的抑制作用。

10 Gb/s 信号 Super-CRZ 码与 NRZ 码的谱宽比较如图 2-21 所示。

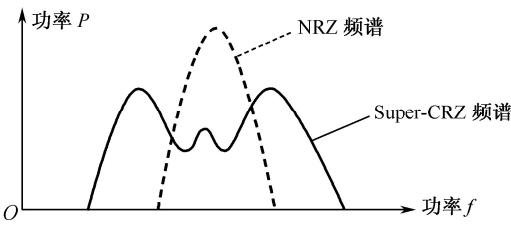


图 2-21 Super-CRZ 与 NRZ 码的频谱比较

3) 有效抵消 SPM 效应

Super-CRZ 采用独特的预啾啾技术，预啾啾与 SPM 效应所产生的啾啾特性正好相反，所以可有效地抵消 SPM 效应所产生的影响。

4) 误码性能更优越

Super-CRZ 技术因其独特的时钟和数据调制方式，使其眼图具有更大的张开度，光脉冲的前后沿更加平滑，不仅使抖动性能更好，而且更有利于时钟的提取与信号的判决，使系统的误码性能更加优越。

5) 实现简单、成本低

Super-CRZ 技术并未采用复杂的调制技术与相干检测技术，而是采用成熟稳定的强度调制-直接检测技术，所以实现简单、成本低。它对现有的 WDM 系统冲击很小，系统原有的 DCM 色散补偿、光放大器配置，甚至原来的 NRZ 接收设备都不需要更改，只需要对发送部分做有限的修改，所以兼容性非常好，大大降低了系统的成本。

采用 Super-CRZ 编码技术，配合其他技术如 FEC、光放大器等，可使 40×10 Gb/s WDM 系统的传输距离达到 4 000 km。

Super-CRZ 技术的缺点是频谱较宽，难以用于 $N \times 40$ Gb/s 的 WDM 系统。

3. 超级差分归零码 Super-DRZ

超级差分归零码 Super-DRZ (Differential RZ) 技术是用于通路间隔 25 GHz、 $N \times 10$ Gb/s WDM 系统的 RZ 编码调制技术，可使 C 波段的传输容量达到 1 920 G WDM 系统 (192 波)。

Super-DRZ 码在 RZ 码的基础上，在两个相邻“1”码之间加入 π 相位差，如图 2-22 所示。

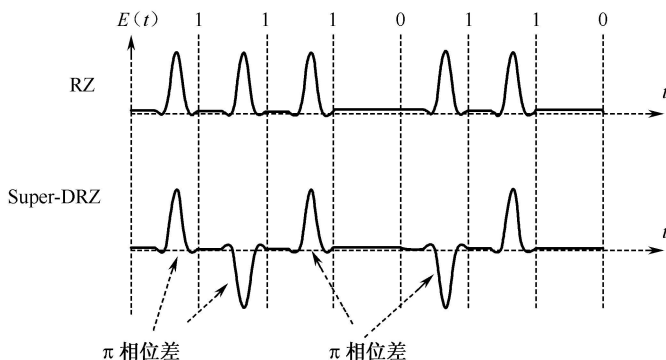


图 2-22 Super-DRZ 码示意图

由图 2-22 可见，无论是相邻“1”码之间是否有“0”码出现，它们之间都相差一个 π 相位（相差 π 相位目前只能从光电转换之后的电脉冲观测出来），所以可有效地减小相邻“1”码在传输过程中产生的码间干扰，大大提高了系统的色散容限。

具体实现时，它利用 NRZ 码的上升沿产生一个 RZ 码，利用 NRZ 码的下降沿产生另一个 RZ 码，从而使相邻“1”码之间总是相差一个 π 相位。

Super-DRZ 技术具有以下优点：

1) 可用于通路间隔为 25 GHz 的 $N \times 10$ Gb/s WDM 系统

Super-DRZ 码的占空比为 50%，所以频谱宽度比 Super-CRZ 码窄，可用于通路间隔为 25 GHz 的 $N \times 10$ Gb/s WDM 系统，使 C 波段的传输容量达到 1 920 Gb/s WDM（192 波），具有极高的频谱利用率。

2) 高色散容限

由于相邻“1”码之间的 π 相位差，所以不管相邻“1”码之间有多少个“0”码，都可以有效地抵消相邻“1”码因色度色散引起的脉冲展宽效应，大大减小了码间干扰，因为相邻“1”码之间的码间干扰是最主要的码间干扰，所以 Super-DRZ 码的色散容限远大于普通的 RZ 码，拥有与 NRZ 码相同的水平，如对于 10 Gb/s 信号，其色散容限可以达到 1 650 ps/nm（M-Z 调制）。

3) 低 OSNR 容限

Super-DRZ 码的占空比为 50%，所以在理论上比 NRZ 码降低了约 2 dB 的 OSNR 容限。

同样是因为相邻“1”码的 π 相位差，大大减小了码间干扰，所以比普通的 RZ 码更容易进行判决，又进一步降低了 OSNR 容限。

4) 提高了非线性效应容限

Super-DRZ 码的频谱宽度是 NRZ 码的 2 倍，所以发送端光纤中的功率谱密度比 NRZ 码低，可以提高非线性效应的容限，尤其是第一类非线性效应。

5) 实现简单、成本低

Super-DRZ 技术在发送端用一个 M-Z 调制器就完成了相位、数据与脉冲调制，在接收端采用直接检测技术，所以实现简单、技术成熟、成本低。它同样对现有的 WDM 系统

冲击很小，只须对发送部分进行有限的修改，所以兼容性非常好，大大降低了系统的成本。
Super-CRZ 技术的缺点是频谱相对较宽（与 NRZ 码相比），难以用于 $N \times 40$ Gb/s 的 WDM 系统。

4. 载波抑制归零码 CS-RZ

CS-RZ (Carrier Suppressed RZ) 技术是用于通路间隔 100 GHz、 $N \times 40$ Gb/s WDM 系统的 RZ 编码调制技术。

CS-RZ 技术采用两级调制即时钟调制与数据调制，第一级调制产生 CS-RZ 光脉冲，第二级调制产生 CS-RZ 数据信号光脉冲。

它在 RZ 码的基础上，在两个相邻码元（不管是“1”码还是“0”码）之间加入 π 相位差。 π 相位差相当于给光信号加了一个正、负号而载波不变。这些具有正、负极性的光信号，在“1”码与“0”码等概率出现的情况下，其平均值为零，所以其频谱零频率并没有尖峰出现，可以减小码间干扰，这就是“载波抑制”的由来。CS-RZ 码示意图如图 2-23 所示。

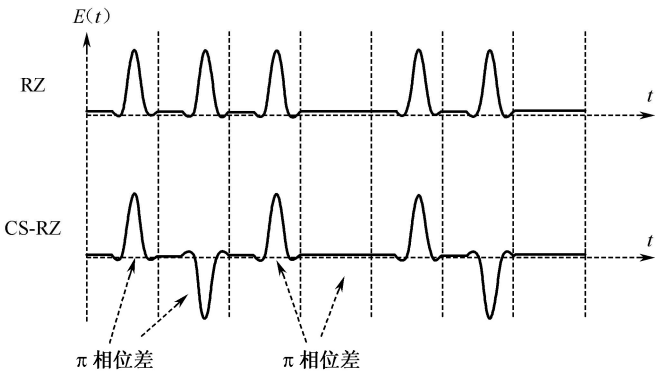


图 2-23 CS-RZ 码示意图

CS-RZ 技术具有以下优点：

1) 保持了 RZ 码原有的优势

如降低了 OSNR 容限（约 2 dB），弱化了 PMD 影响，提高了非线性效应容限。

2) 提高了色散容限

一方面由于相邻码元之间具有 π 相位差，所以可以减小前、后码元因色度色散引起的脉冲展宽效应，减小了码间干扰；另一方面 CS-RZ 码的占空比为 66%，所以其频谱宽度比普通 RZ 码又有较大压缩，使系统的色散容限有了较大提高。

3) 实现相对比较简单

CS-RZ 技术在发送端采用两级 M-Z 调制器来实现，第一级 M-Z 调制器使相邻码元之间产生 π 的相位差，第二级 M-Z 调制器进行数据加载。但在接收端无须很大的改动。

总之，CS-RZ 技术在没有大幅度增加设备复杂性与成本的基础上，可以获得优良的系统性能。

CS-RZ 技术的缺点是，其谱宽介于普通 RZ 与 NRZ 之间，如 40 Gb/s 信号的谱宽约为 90 GHz，所以一方面其色度色散容限不是很高，另一方面要想实现通路间隔为 50 GHz

的 $N \times 40$ Gb/s WDM 系统，必须进一步压缩带宽，但这样将比较大地增加成本。

5. 光双二进制码

光双二进制码 ODB (Optical Double-Binary) 技术是用于通路间隔 50 GHz WDM 系统的编码调制技术。

ODB 又称相位整形二进制码 PSBT (Phase Shaped Binary Transfer) 码，本质上还是 NRZ 码，但它将载波在每个相邻的“1”码与“0”码之间变化 π 相位，实现了在光域二电平的传输。

传统的双二进制调制采用的是三电子幅度调制方式，但光域的二电子会使接收机灵敏度劣化，而 ODB 利用相位调制与幅度调制相结合的方法实现了电域三电平、光域二电平的传输。

ODB 码具有以下优点：

1) 高色度色散容限

它将载波在每个相邻的“1”码与“0”码之间变化 π 相位，所以减弱了前、后“1”码因色度色散引起的脉冲展宽效应，故可以获得很高的色度色散容限。

2) 可实现通路间隔 50 GHz 的 WDM 系统传输

ODB 码的频谱宽度较窄，所以可以实现通路间隔 50 GHz 的 WDM 系统传输。

3) 实现简单、成本较低

ODB 码只需要在发送端进行适当改造，即换成双驱动的 M-Z 调制器，增加一个电滤波器，接收端无须改造，所以实现简单，成本较低。

ODB 码的缺点是 OSNR 容限较高，基本上与 NRZ 码相同，而且抗非线性效应的能力比较差。如想用于通路间隔 50 GHz， $N \times 40$ Gb/s WDM 系统，需要进一步采取措施，但这样会增加成本。

6. 差分相移键控 RZ-DPSK

RZ-DPSK (Differential Phase Shifting Key) 技术是用于通路间隔 100 GHz、 $N \times 40$ Gb/s WDM 系统的 RZ 编码调制技术。

RZ-DPSK 技术属于相干通信范畴，在发送端采用差分相移键控调制技术，将业务信息由相邻光脉冲的差分相位变化来承载，光脉冲仅作为载波使用。如当两个相邻光脉冲的相位相反时 (π 相位差) 代表业务信号的“1”码，两个相邻光脉冲的相位相同时 (0 相位差) 代表业务信号的“0”码，如图 2-24 所示。

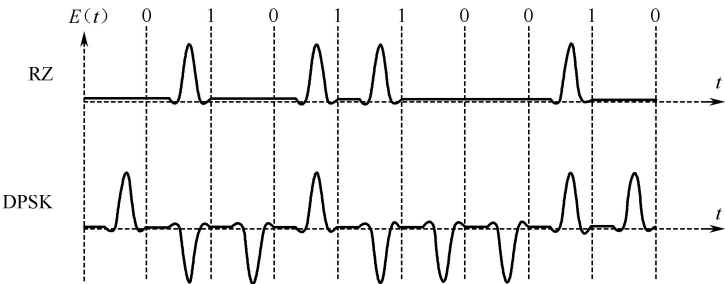


图 2-24 DPSK——用码元相位变化承载业务信息

RZ-DPSK 技术的调制方框图如图 2-25 所示。

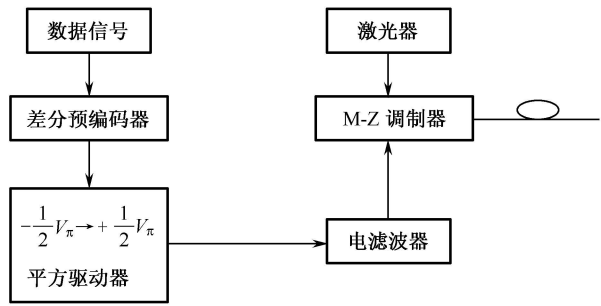


图 2-25 RZ-DPSK 调制原理图

由于 RZ-DPSK 的发送端采用差分相移键控调制，所以在接收端需要用相干检测技术，如使用平衡接收机，即用非对称马赫-曾德尔 AMZ 干涉仪将相位调制转换成强度调制，再使用直接检测的光接收机。

RZ-DPSK 技术具有以下优点：

1) 降低了 OSNR 容限

因为 RZ-DPSK 技术在接收端对“1”与“0”码的判决不是传统的幅度判决原则，而是通过对相邻光脉冲相位变化的检测进行判决，所以对 OSNR 的要求要低得多，即比普通 RZ 码的 OSNR 容限还要低。

2) 对非线性效应有很强的抑制能力

当平均光功率相同时，DPSK 码的峰值功率可以比普通 RZ 码低约 3 dB，所以对第一种类型非线性效应，即由峰值光功率过高产生的 SPM，XPM，FWM 效应具有很强的抑制能力。

RZ-DPSK 技术目前还不十分成熟。RZ-DPSK 技术的缺点，一是会产生非线性相位噪声，即光功率的起伏通过 SPM 效应会产生相位波动，即所谓非线性相位噪声；二是技术比较复杂、成本较高。它不仅要在发送端使用比较复杂的相位调制技术，而且在接收端也要进行相干检测。

7. RZ-DQPSK

RZ 码的差分正交相移键控 RZ-DQPSK (Differential Quadrantal Phase Shifting Key) 技术是用于通路间隔 50 GHz、N×40 Gb/s WDM 系统的 RZ 编码技术。

RZ-DQPSK 技术把 40 Gb/s 业务信号分成两路并行信号，所以每路信号的传输速率降为 20 Gb/s，然后对每路信号独立地进行 DPSK 调制，即仍由相邻光脉冲的差分相位来承载业务信息，如用相邻光脉冲的 π 相位差代表业务信号的“1”码，用相邻光脉冲的同相位代表业务信号的“0”码。与 DPSK 技术不同的是，RZ-DQPSK 的第 1 路信号的 π 相位差为 $0\sim\pi$ ，第 2 路信号的 π 相位差为 $\pi/2\sim3\pi/2$ ，RZ-DQPSK 的正交调制示意图如图 2-26 所示。

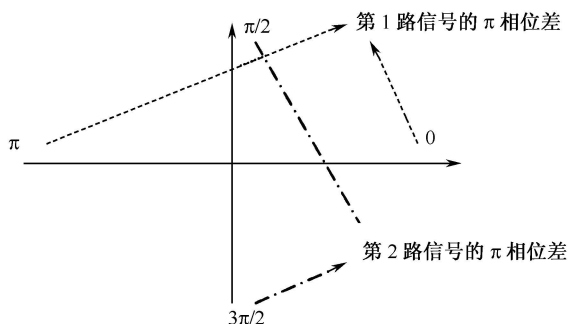


图 2-26 RZ-DQPSK 的正交调制示意图

RZ-DPSK 技术具有以下优点：

1) 高色度色散容限

DQPSK 技术把原来的传输速率降低了一半，大大提高了系统的色度色散容限，在理论上比 DPSK 技术的色度色散容限又提高了近一倍。

2) 降低了 OSNR 容限

RZ-DQPSK 技术也是通过检测相邻光脉冲的相位变化来进行判决，并且每路信号的传输速率降低了一半，所以其 OSNR 容限在理论上又比 RZ-DPSK 技术降低了约 3 dB。

3) 对非线性效应有很强的抑制能力

RZ-DQPSK 技术的缺点与 DPSK 技术基本相同，而且技术更复杂、成本更高，因为它在发送端需要使用两个技术复杂的相位调制器，而且在接收端也要使用两个平衡接收机。

同样，RZ-DQPSK 技术目前还不是很成熟。

8. CSRZ-DPSK

载波抑制归零—差分相移键控（CSRZ-DPSK）是在综合 CS-RZ 与 DPSK 两种技术的基础上提出来的，所以具有优越的综合性能。

CSRZ-DPSK 的调制电路基本上是 CS-RZ 调制器与 DPSK 调制器两者的叠加，一方面像 DPSK 码那样，业务信息由光脉冲的相位变化来承载，另一方面又像 CS-RZ 码那样在相邻光脉冲之间引入了 π 相位差。

CSRZ-DPSK 技术的特点如下：

- (1) 对非线性效应有很强的抑制能力；
- (2) 进一步降低了 OSNR 容限；
- (3) 提高了色度色散容限；
- (4) 弱化了 PMD 影响。

综上所述，采用 RZ 编码调制技术，结合其他一些技术如 FEC，FRA 技术等，不仅可以抑制非线性效应的发生，而且还可以降低 OSNR 容限、弱化 PMD 影响，从而可实现大容量 WDM 系统的 ULH 传输。

2.5 监控技术

与常规的 SDH 不同, WDM 系统增加了对 EDFA 的监测与管理功能。由于 EDFA 只有光放大而无电信号的接入, 尤其是作为光再生器使用时, 因没有业务信号的上下而无任何电接口接入, 这使监控增加了难度, 此外在 SDH 开销中也没有对 EDFA 进行监控的专用字节, 所以必须增加一个信号来对 EDFA 的状态进行监控。另外由于 WDM 系统也需要完善的监控技术, 包括对各相关部件的故障告警、故障定位、运行中的质量参数监控、线路中断时备用线路的控制等。因此在系统设计时要预先考虑设置光监控信道。

光监控通路 OSC (Optical Supervision Channel) 的作用就是在一个新波长上传送有关 WDM 系统的网元管理和监控信息, 当然也包括对 EDFA 的监控信息。

1. 对 OSC 的要求

(1) OSC 不应限制光放大器中泵浦光源的光波长 (980 nm 和 1 480 nm);

(2) OSC 不应限制两个线路放大器间的传输距离;

(3) OSC 不应限制未来在 1 310 nm 波长的业务;

(4) 线路放大器失效时 OSC 应仍然可用, OSC 所传送的监控信息包括各类光放大器的有关信息, 如光放大器的输入光功率、输出光功率、泵浦光源的工作波长等, 因此若当光放大器失效时 OSC 也随之不能正常工作, 失去了进行监控的意义;

(5) OSC 的传输应该是分段的双向传输, 双向传输可以保证一旦一根光纤被切断, 监控信息仍可以在线路终端被接收到;

(6) OSC 传送的监控信息应可以在每个光再生站和 WDM 系统局站上分出或接入。

2. OSC 的实现方式

1) 带外波长监控

带外波长监控方式是指 OSC 的波长选择在 EDFA 的增益带宽之外。由于 OSC 的波长在 EDFA 的增益带宽之外, 所以 OSC 信号在整个系统中不能得到放大, 也就是必须在 EDFA 前取出 (下光路), 在 EDFA 之后再插入 (上光路)。由于带外监控信道的光信号得不到 EDFA 的放大, 所以传送的监控信息速率不能太高 (一般为 2 048 kb/s)。不过由于 2M 系统的接收灵敏度足够高, 可以达到 -50 dBm, 因而虽不经 EDFA 放大也能正常工作。目前对带外监控的波长通常选在 $(1\,510 \pm 10)$ nm。

2) 带内波长监控方式

带内波长监控方式是指 OSC 的波长选择在 EDFA 的增益带宽之内 (1 532 nm)。为了不占有宝贵的 EDFA 增益带宽, 通过将监控信道的波长选择在 EDFA 增益带宽的平坦区边缘的下降区, 监控信道的速率可提高至 155 Mb/s。尽管 1 532 nm 波长处于 EDFA 增益平坦区以外的下降区, 但因 155 Mb/s 系统的接收灵敏度优于 WDM 各个主信道系统的接收灵敏度, 所以监控信息仍能正常传输。带内监控的波长通常选在 $(1\,532 \pm 4)$ nm。

第3章 光放大器

光放大器就是直接将光放大的器件。波分复用技术的商用化，离不开光放大器的商用化，由本书前面章节可知，密集波分复用最常用的 C 波段就是光放大器的工作波段，所以波分复用技术与光放大器技术是密不可分的。由于波分复用技术同时是其他未来全光通信网的基础，所以光放大器也是未来全光网的一块重要的基石。

3.1 概述

3.1.1 光放大器的作用

长距离光纤通信系统中延长通信距离的方法是采用再生器。在光放大器出现之前，这些再生器都是光—电—光中继方式，该方式首先将光信号转换为电信号，然后对电信号进行再定时、再整形、再放大（或称“3R 再生”）等信息处理，最后将电信号转换为光信号，经光纤传送出去。通过这样的一个再生器可将通信距离延长 80~100 km，通过级联多个光电光再生器就可以建成长途光纤通信系统，显然这种再生器需要光接收机和光发送机来分别完成光电变换和电光变换，设备复杂，运行维护不便，而且随着光纤通信的速率越来越高，这种光电光中继器在整个光纤通信系统的成本越来越高，使得光纤通信的成本增加，性价比下降。光放大器的出现，取代了原有的光电光再生器，使原来每 50~100 km 就需要一次电再生中继，发展为每 80~120 km 需要一次光再生中继，而每 2 000 km 才需要一次电再生中继（2003 年，TYCO 公司建设的海底系统实现了电再生中继距离达 11 000 km），使得通信成本大幅降低。

在海缆通信系统中，光电光再生器的数量直接决定着系统建设和未来维护的成本，为了增加中继距离，人们不得不采用价格高昂的 G.654 光缆，原因是 G.654 光缆的衰减系数能够达到 0.15~0.17 dB/km。光放大器出现后，G.654 的衰减系数的优势已经不再明显，OFS 公司利用光放大器在 G.652 光纤实现光再生距离 200 km、电再生距离 2 400 km 的传输，这样在海缆系统中，不仅由于光放大器取代了光电光再生器而降低了成本，同时利用 G.652 光纤代替 G.654 光纤又进一步降低了成本。

光放大器在波分复用系统中用于实现多波长的同时放大。波分复用技术就是在同一根光纤上同时传输多个不同波长光载波的通信技术。这种通信方式的优点在于它充分利用了光纤的潜在带宽，使光纤通信容量的增长方式从单纯的时分复用方式转变为复用更多的波长数方式，大幅度提高了光纤通信系统的传输容量。如果没有光放大器，每个中继站都要用波分解复用器将多波长光信号分开，通过光—电—光转换过程对每一波长分别进行处理，以实现对光信号的放大，然后再利用波分复用器将不同波长的光复用到一根光纤中继续传输。这就需要在每一个中继站都要有数量与信道数相对应的光纤通信设备，此外还有波分复用器与波分解复用器。而光放大器就可以同时实现多波长放大，真正实现光域放大，保证了信号的透明传输。在光放大器代替波分复用光—电—光再生器

的同时，由于器件数量少，降低了功耗，减少了机房占地面积，延长了设备维护周期。

光放大器用于补偿波分复用系统无源器件的插入衰耗。在波分复用系统中，波分解复用器和波分复用器插入衰耗比较大（商用 40 波光纤耦合器波分复用器达 17~20 dB，波分解复用器插入衰耗的典型值为 10 dB 左右），使得波分复用系统的中继距离接近零，根本无法商用。光放大器用做光功率放大器和光前置放大器就可以补偿这些器件的插入衰耗，另外，波分复用系统由于电再生中继距离的不断延长，使得越来越多的色散补偿光纤被引入到长途波分复用系统中来，光放大器也常常被用来补偿色散，补偿光纤的衰耗。

光放大器促进了光接入网技术的蓬勃发展。以前的通信业务仅限于电话，但是随着社会和技术的发展，高清晰电视、多媒体通信、互联网、电子商务开始走进千家万户，人们对信息的需求使进入用户家庭的带宽越来越宽，但是只有光纤才能满足用户将来对带宽的潜在需求，这就是光接入网的产生背景。而光放大器可以补偿光信号由于分路带来的衰耗，扩大本地网的网径，增加用户，最终实现接入网光纤到桌面的目标。应用 EDFA 的光缆有线电视传输系统已于 1993 年投入使用，在这种系统中，光的结点数、传输距离与光纤中信号光功率密切相关，使用 EDFA 可以扩大网径和扩容用户数，目前我国已经出现大量的采用 EDFA 的光纤 CATV 网。

光放大器还促进光孤子通信技术的实用化。光孤子通信是利用光纤非线性来补偿光纤色散作用的一种新型通信方式。当光纤的非线性和色散二者达到平衡时，光脉冲形状在传输的过程中将保持不变。光孤子通信的主要问题之一是光纤衰耗。当光孤子脉冲沿光纤传输时，其功率逐渐减弱，这将破坏非线性与色散之间的平衡。解决的方法之一就是在光纤传输线路中每隔一定距离加一个光放大器来补偿线路功率衰耗，使光信号在传输过程始终满足光孤子方程。可以说，通过光纤中的色散脉冲展宽与非线性脉冲压缩相均衡构成的光孤子通信这种新型的通信方式，同时解决了光纤传输中的衰耗与色散问题。1991 年，英国科学家利用 EDFA 中继光孤子通信技术在实验室实现了无中继传输 1 Gm。目前在日本已经有了光孤子通信市话网。

此外，光放大器还是未来全光通信网中不可缺少的重要器件。随着波分复用技术的日益普及，光纤传输的速率越来越高，光纤通信网络中任何电子器件都可能成为光纤通信系统带宽的“瓶颈”。实现全光通信是光纤通信技术发展的必然趋势，光放大器的诞生从线路上解决了光纤通信的无电再生中继问题，它还必将与层出不穷的新器件、新技术组合在一起，逐步实现光纤通信系统的全光化。

3.1.2 对光放大器的要求

要了解光纤通信系统对光放大器的要求，就必须首先掌握一些重要的参数指标。光放大器的主要参数有增益、带宽和噪声系数等。

1. 光放大器的增益

光放大器既然能够进行光放大，那么人们最关心的是它到底能放大多少倍。描述光放大器放大倍数的参数叫光放大器的增益 G 。

放大器的增益 G 定义为

$$G(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}(\text{mW})}{P_{\text{in}}(\text{mW})} \tag{3-1}$$

式中, P_{out} , P_{in} 分别为放大器输出端与输入端的连续信号功率。

在光纤通信系统测试中, 光功率单位习惯上用 dBm 表示, 则光放大器的增益又可以表示为:

$$G(\text{dB}) = P_{\text{out}}(\text{dBm}) - P_{\text{in}}(\text{dBm}) \quad (3-2)$$

2. 放大器的工作带宽

前面提到, 光放大器在波分复用系统中能够实现多波长的同时放大, 那么光放大器到底能够放大哪些波长呢? 如果放大器在所有波长都能放大, 而且增益系数一样, 那么在波分复用系统中就可以使用光纤低衰减区的所有波长, 增加 WDM 系统的信道数目。但是, 实际光放大器的放大作用总是有一定的频率范围, 或者说光放大器能够商业化应用的工作波长是有一定范围的。

光放大器的工作带宽定义为小信号增益低于峰值小信号增益 $N(\text{dB})$ 的频率间隔。通常取 $N=3 \text{ dB}$, 此时 G 降为 G_0 的一半, 因而也叫半高全宽带宽。

3. 增益饱和与饱和输出功率

前面在工作带宽定义中提到了“小信号增益”, 小信号增益到底和大信号增益有什么区别? 这与光放大器的原理有关, 首先光放大器放大光信号是需要能量的, 这个能量来自于泵浦源激光器。光放大过程就是通过采用某种机理将泵浦光的能量转化为信号光的能量来实现的。泵浦源激光器是有一定功率范围的, 所以放大后的信号光功率肯定存在一定的功率范围。假设泵浦源光功率为 100 mW , 光放大器的增益为 20 dB , 则当光放大器输入信号光功率为 -20 dBm 时, 光放大器输出光功率为 0 dBm ; 但是当光放大器输入信号光功率为 10 dBm 时, 光放大器输出光功率不能达到 30 dBm 。因为 30 dBm 相当于 1000 mW 的光功率, 而信号光和泵浦光加起来才 110 mW , 所以最大输出功率不可能大于 110 mW , 即使最大输出功率为 110 mW , 与输入光功率相比才增益了 10.4 dB , 而不是原来小信号增益的 20 dB 。由于大信号放大过程消耗了大量高能级上的粒子, 使得增益系数随着信号输入功率的增大逐渐减小, 这种现象称为光放大器的增益饱和。当信号功率增加而使放大器增益减小为峰值增益(小信号增益)的一半(增益系数下降 3 dB)时, 所对应的输出功率叫做光放大器的饱和输出功率。光放大器的饱和输出功率是光放大器的重要参数, 用 $P_{\text{out}}^{\text{s}}$ 表示。

4. 放大器噪声系数

放大器放大的过程会产生噪声, 光放大器的噪声主要源自它的放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)。在激光器中, 自发辐射是产生激光振荡必不可少的, 而在放大器中它却是噪声的主要来源, 它与信号光在光纤中一起传输、放大, 降低了信号光的信噪比。当然信号光自身噪声、泵浦源噪声等也会影响光放大器的噪声性能, 由于其影响比较小, 此处不进行深层讨论。

由于放大器存在噪声, 放大器在放大信号时必然会增加噪声, 劣化信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), 限制系统的电再生中继距离。信噪比的劣化用噪声系数 F_n 表示, 是光放大器的另一重要指标, 它定义为信号光的输入信噪比与输出信噪比之差:

$$F_n(\text{dB}) = \text{SNR}_{\text{in}}(\text{dB}) - \text{SNR}_{\text{out}}(\text{dB}) \quad (3-3)$$

式中, $(\text{SNR})_{\text{in}}$ 和 $(\text{SNR})_{\text{out}}$ 分别代表信号的输入信噪比与输出信噪比。它们都是通过接收机端将光信号转换成光电流后的功率来计算的。

光纤通信系统对光放大器的要求如下:

- (1) 增益高;
- (2) 工作范围宽且增益平坦;
- (3) 饱和输出光功率大;
- (4) 插入衰耗低;
- (5) 噪声系数低;
- (6) 工作特性稳定, 最好与温度、偏振态无关;
- (7) 体积小, 重量轻, 功耗低, 工作寿命长。

实际光放大器并不是上面所有的指标都很优异, 不同性能的光放大器被放置在波分复用系统中的不同位置。饱和输出功率大的激光器用于光纤通信系统的光发送端, 称为光功率放大器 (OPA); 对于噪声系数低的光放大器放在光纤通信系统的光接收端, 称为光前置放大器 (OPA)。

3.1.3 光放大器的种类

1. 从工作机理上划分

从工作机理上划分, 光放大器有如下几种: 掺杂光纤放大器、非线性效应光纤放大器和半导体光放大器 SOA 等。

1) 掺杂光纤放大器

掺杂光纤放大器, 就是将稀土金属离子掺入光纤纤芯, 稀土金属离子在泵浦源的激励下, 能够对光信号进行放大的一种放大器。掺杂光纤中的稀土金属离子在大功率泵浦光的作用下可形成粒子数反转分布, 因此当有外来光信号输入时会受激辐射, 发出与外来光波长相同的光, 从而产生光放大作用。

目前最成功的典型光放大器是掺铒光纤放大器 (EDFA)。EDFA 专门工作于 1 550 nm 波长范围 (C 波段或 L 波段), 现已实用化, 在光纤通信系统 (单波长系统或 WDM 系统) 中得到了非常广泛的应用。

掺铥光纤放大器 (TDFA) 有望用于 S 波段, 掺镨光纤放大器 (PDFA) 是专门为 1 310 nm 波长区研制的。目前这两种新的掺杂光纤放大器性能已经接近掺铒光纤放大器。

2) 非线性效应光纤放大器

在波分复用系统出现以前, 光纤中的总光功率一般在几毫瓦以下; 当波分复用技术出现以后, 光纤中的光功率就可能超过几百毫瓦甚至上千毫瓦, 这时, 就会出现许多因为强光而产生的新效应, 这些效应统称为非线性效应。光纤中的非线性效应有受激喇曼散射、受激布里渊效应、自相位调制、交叉相位调制等, 非线性效应光纤放大器就是利用光纤中的各种非线性效应制成的光放大器。非线性效应光纤放大器有受激喇曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 光纤放大器、受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 光纤放大器和利用四波混频效应 (four wave mixing, FWM) 的光放大

器等，喇曼光纤放大器是目前应用最为广泛的非线性效应光纤放大器。

3) 半导体光放大器

半导体光放大器 SOA 利用受激辐射发光的原理对输入光信号进行放大，其结构大体上与激光二极管（laser diode, LD）相同。如果在法布里-派罗腔（Fabry-Perot cavity, F-P）两个端面镀反射率较高的介质膜就形成了 F-P 型半导体激光器，又叫驻波型光放大器；如果在两端面根本不镀反射膜或者镀增透膜则形成行波型光放大器。半导体激光器指的是前者，而半导体光放大器指的是后者。

SOA 的工作波长范围非常宽阔，既可以用于 1 550 nm 波长区也可以用于 1 310 nm 波长区，同时具有体积小、功耗低、增益高与易驱动等优点。但其缺点也非常突出，即与光纤耦合困难，耦合损耗大，对光的偏振特性比较敏感等。这些缺点导致 SOA 在光网络的实际应用中进展缓慢，但它的潜力巨大，相信不久的将来可以完全实用化。

2. 从放大特性上划分

从放大性能上划分，光放大器可分为功率锁定型和增益锁定型两大类。

1) 增益锁定型

增益锁定型是指其输出光功率值与输入光功率值之比（放大器的增益）为一固定值。也就是说，光放大器的输出光功率随输入光功率变化而变化，当然输入光功率必须在规定范围内。

增益锁定型的光放大器适用于 WDM 系统。它的最大好处是，可以分别对每个复用通道光信号同时进行固定增益放大，使各复用通道的光功率输出彼此相互独立。因此不仅各通道的光功率预算方便易行，而且也避免了因增加、减少复用光通道而影响其他复用光通道的弊病。

2) 功率锁定型

所谓功率锁定型，是指当输入光功率大于规定值时，光放大器的输出光功率为一固定值，并不随输入光功率值的变化而变化。它能够允许线路损耗在一定范围内波动。

3. 从物理位置上划分

从在 WDM 系统中所处物理位置上划分，光放大器可分为光功率放大器、光前置放大器和光线路放大器三类。

1) 光功率放大器（OBA）

光功率放大器（optical booster amplifier, OBA）的主要作用是对发送端光信号进行放大，目的是增加发送端的光功率输出，以增大传输距离。因此 OBA 一般置于光发送机之后，当然在 WDM 系统中置于合波器之后，以达到同时补偿波分复用器的插入损耗和放大复用光通路信号的目的。为了避免光纤的非线性效应，OBA 光功率输出一般应低于+20 dBm。

2) 光前置放大器（OPA）

光前置放大器（optical pre-amplifier, OPA）的主要作用是对接收端的微弱光信号进行预放大，以满足接收端对光功率的要求。因此 OPA 一般置于光接收机之前，当然在 WDM 系统中应置于分波器之前，以达到同时补偿波分解复用器插入损耗和对所有复用

通路光信号进行预放的目的。

3) 光线路放大器 (OLA)

光线路放大器 (optical line amplifier, OLA) 的作用相当于一个光再生器。它既具有较高的灵敏度又有较大的光功率输出。OLA 的结构一般是由 OBA 和 OPA 串接而成, 但中间要加光衰减器 (防止前置放大器过载), 并且处于线路中的适当位置。

3.2 掺铒光纤放大器 (EDFA)

掺铒光纤放大器 (EDFA) 是掺铒光纤在泵浦源的作用下, 能够对某些波长的信号光进行放大的光放大器。EDFA 的研究工作可追溯到 1963 年对玻璃激光器的研究, 玻璃激光器是通过在玻璃基质中掺杂活性离子来产生激光的。1964 年, 美国光学公司制成了第一台掺铒玻璃激光器, 其室温下的激射波长是 $1.54\text{ }\mu\text{m}$ 。1970 年光纤出现后, 人们转入在光纤中掺杂激光器件的研究。1985 年, 英国的南安普顿大学的迈尔斯等人制成了掺铒光纤激光器, 1986 年又制造出第一个掺铒光纤放大器, 用 Ar 离子激光器做泵浦源, 在 3 m 长的光纤中得到了 3.28 dB 的增益。大功率半导体激光器的诞生更是为 EDFA 插上了腾飞的翅膀, 用它做 EDFA 的泵浦源只要数十毫瓦的泵浦功率就可以产生数千倍的增益, EDFA 技术此后便迅速实用化。如今 EDFA 已广泛应用于光纤通信和光纤有线电视网, 为光纤通信的更新换代开辟了新途径。

3.2.1 EDFA 的工作原理

掺铒光纤放大器 (EDFA) 与激光器的工作原理类似。在泵浦源的作用下, 工作物质粒子由低能级跃迁到高能级, 得到了粒子数反转分布而具有光放大作用。当工作频带范围内的信号光输入时, 信号光就会得到放大, 这就是掺铒光纤放大器的基本工作原理。只是 EDFA (及其他掺杂光纤放大器) 细长的纤形结构使得有源区能量密度很高, 光与物质的作用区很长, 有利于降低对泵浦源功率的要求。

铒的原子序数为 68, 原子量为 167.2, 价电子为 3, 属镧系元素。它是以三价离子的形式参与工作的。掺杂铒离子分散于基质之中, 它属于分立能级, 但由于光纤基质结构产生的本地场的影响, 对铒离子产生微扰, 使其谱线分离开来, 这叫斯塔克效应。这些分裂态之间的能级差与能级之间的能量差相比是很小的, 于是形成了准能带。

参与光放大过程的有 3 个能带 (见图 3-1)。 $^4I_{15/2}$ 相当于 E_1 , 为基态。 $^4I_{13/2}$ 相当于 E_2 , 为受激辐射的高能级。受激辐射跃迁所产生的光子波长为 $\lambda=c \cdot h/(E_2-E_1)=1\ 520\sim 1\ 570\text{ nm}$, 这就是能够放大的信号光波长范围。 E_3 是泵浦的高能级。泵浦光的泵浦作用发生在 E_3 与 E_1 之间, 泵浦频率为 $\nu_p=(E_3-E_1)/h$, 可以选择不同的能级作为 E_3 。在外界泵浦源的作用下, 基态 $^4I_{15/2}$ 上的电子吸收泵浦源的能量而跃迁到 E_3 能级上。 E_3 能级上的电子主要通过无辐射跃迁的形式, 迅速转移到 E_2 能级上。 E_3 能级最好能有较大的宽度, 以充分利用宽带泵浦源的能量来提高泵浦效率。图 3-1 中的 τ 表示该能级的寿命, E_3 能级的寿命很短, 而 E_2 能级的寿命较长, 大于 10 ms, 属于亚稳态能级, 容易聚集电

子。当泵浦源足够强时，便在 E_2 能级上聚集足够多的粒子，在 E_2 和 E_1 能级之间形成粒子数反转分布，此时便对信号具有放大作用。

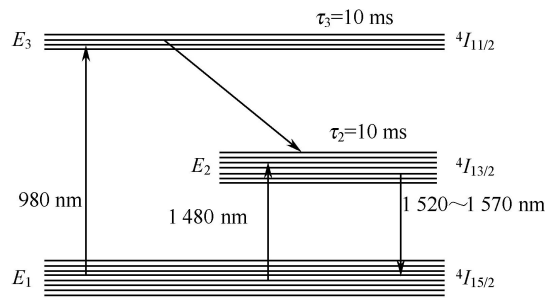


图 3-1 EDFA 的工作能级

目前 EDFA 均使用 980 nm 和 1480 nm 两个波长半导体激光器作为泵浦源。因为这两个频率作为泵浦时 EDFA 增益高、噪声低，而且由于它们是半导体激光器，所以体积小、寿命长、功耗低，在 EDFA 中，这些泵浦源的功率在 50~100 mW 之间。另外，这两个泵浦源在应用的时候还有区别：0.98 μm 泵浦的特点是增益高、泵浦效率高、噪声低，但饱和输出功率低，适合于制作前置光放大器；1.48 μm 泵浦的特点是增益高、泵浦效率较高、噪声稍大，但饱和输出功率大，适合于制作功率光放大器和线路光放大器。1.48 μm 泵浦还有另外的优点，就是它和信号光的波长接近，1.55 μm 的单模光纤对信号光和泵浦光都是单模传输，可用单模光纤制成定向耦合器，将信号光和泵浦光低衰耗地导入光纤。所以这点在使用低掺铒分布型光纤放大器时，应用这一波段的泵浦更为有利，因而得到了广泛的开发、研究和应用。

3.2.2 EDFA 的结构

掺铒光纤放大器（EDFA）一般由掺铒光纤、泵浦源、光耦合器、光隔离器和光滤波器构成。

- （1）掺铒光纤是经过掺杂工艺制成的光纤，它的作用主要是提供能级分布；
 - （2）泵浦源是大功率半导体激光器（泵浦波长一般为 0.98 μm 或 1.48 μm ），泵浦光能量用于铒离子的粒子数反转；
 - （3）光耦合器就是波分复用器，它可以实现 980 nm/1 550 nm（或 1 480 nm/1 550 nm）的光耦合，使泵浦光有效注入到掺铒光纤中；
 - （4）光隔离器的作用是防止反射光沿光纤反向传输，影响信号源和泵浦源的正常工作，两个隔离器还能够防止光在掺铒光纤中形成光振荡；
 - （5）滤波器的作用一方面滤除放大器的带外噪声以提高光放大器的信噪比，另一方面它可以均衡光放大器的增益频谱以提高光放大器的级联性能。
- 掺铒光纤放大器有不同的泵浦方式，根据泵浦方式不同可以分为同向泵浦、反向泵浦、双向泵浦三种方式，如图 3-2 所示。

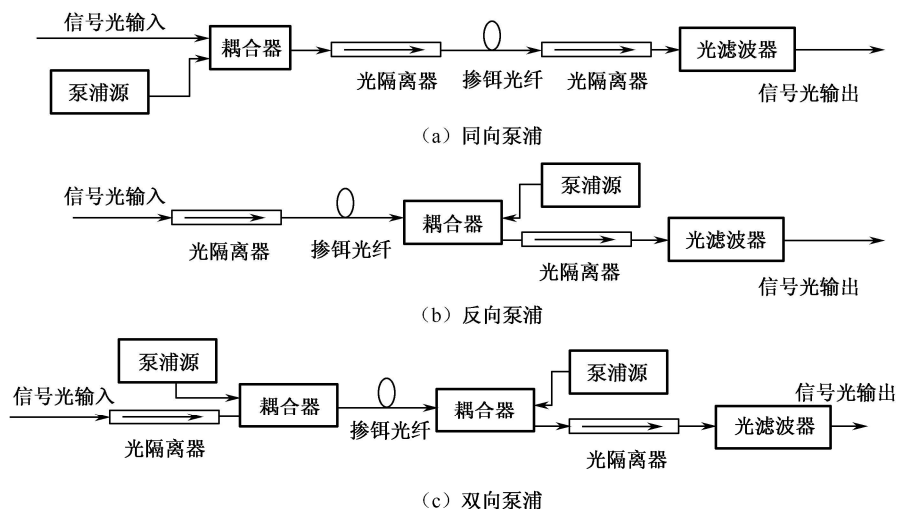


图 3-2 掺铒光纤放大器的泵浦方式

3.2.3 EDFA 的性能参数

1. EDFA 的增益特性

增益特性指的是 EDFA 对输入光信号的放大能力，主要用放大器的增益来衡量，EDFA 的增益定义为放大器的输出光功率和输入光功率的比值，单位为 dB。在 EDFA 中，放大器的增益主要和掺杂光纤 EDF 的掺杂浓度、长度、泵浦光功率大小以及输入光功率值等多种因素有关。

由图 3-3 和图 3-4 可以看出，在输入光功率比较小时，EDFA 的增益比较大，保持基本不变，一般可以得到 30~35 dB 的光信号放大。随着输入光功率的增大，受激辐射加快，以至于减少了粒子反转数，使受激辐射光减弱，EDFA 的输出光功率达到饱和，其增益开始下降，EDFA 最大输出光功率常用 3 dB 饱和输出光功率来表示，意思是当增益从平稳增益下降 3 dB 时，光放大器的输出功率。图 3-5 给出了泵浦光功率对 EDFA 输出光功率和增益的影响，由图 3-5 可见，在开始时 EDFA 的输出光功率和增益随泵浦光功率的增加而几乎呈线性增加，而转换效率可以达到 92.6%；当泵浦光功率增加到一定程度，无论是 EDFA 的输出光功率还是增益都将趋于饱和。

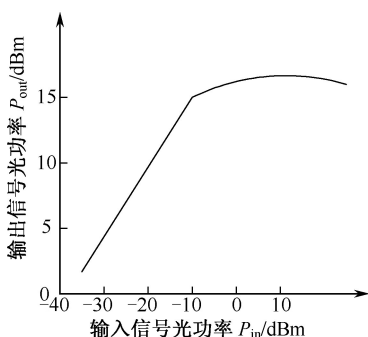


图 3-3 EDFA 输出光功率随输入光功率变化

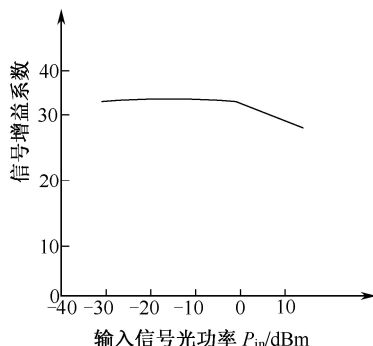


图 3-4 EDFA 增益随输入功率变化

图 3-6 所示为 EDFA 增益与掺杂光纤 (EDF) 的浓度和长度之间的关系。由图 3-6 (a) 可见, 当 EDF 的掺杂浓度超过一定值后, EDFA 的增益反而会下降, 这是因为 Er^{3+} 过量会产生聚合, 引起浓度消光现象。因此, EDF 的掺杂浓度并不是越大越好, 需要适当控制。由图 3-6 (b) 可见, 开始时增益随 EDF 长度的增加而上升, 但当光纤超过了一定长度后, 增益反而逐渐下降, 因此存在着一个可获得最佳增益的最佳长度。但应注意, 这一长度只能是最大增益长度, 而不是 EDF 的最佳长度, 因为 EDF 的长度选择还涉及其他特性 (如噪声特性等)。

一个典型的 EDFA 的增益系数约为 30 dB, 掺铒光纤长度为几米到几十米, 泵浦光功率在 50~100 mW 之间。

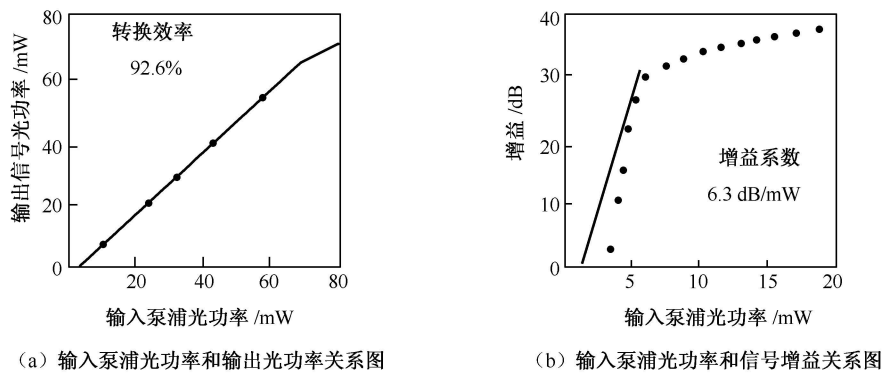


图 3-5 泵浦光功率对 EDFA 输出光功率和增益的影响

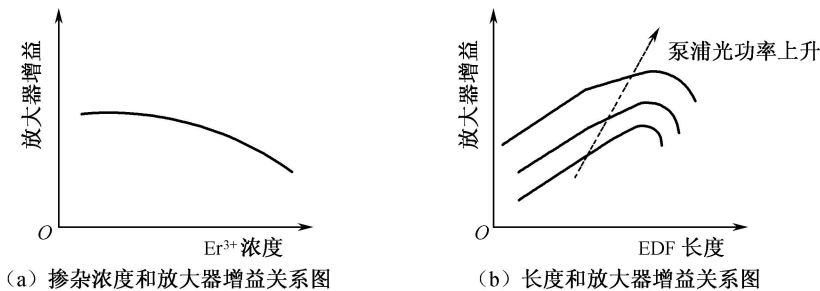


图 3-6 EDFA 增益与掺杂光纤 EDF 的浓度和长度之间的关系

2. EDFA 的带宽

EDFA 可以放大很宽范围内的光信号, 在波分复用系统中, 使用 EDFA 放大 C 波段 (1 530~1 565 nm) 范围的光信号。在 1 565~1 622 nm 波长处, EDFA 的增益会更小, 但是受激辐射仍然要比受激吸收大得多。当光沿掺铒光纤传输时, 就产生了一个净增益, 增益跃然比 C 波段小得多, 但可以通过更长的掺铒光纤累积进行放大, 这就是 L 波段 EDFA 的工作原理。L 波段放大器采用的是铒-铝共掺光纤, 使 EDFA 的工作波段扩展到 1 570~1 610 nm。

目前的波分复用系统若要同时对 C 波段和 L 波段光信号进行放大, 一般采用 C 波段 EDFA 和 L 波段 EDFA 并联来实现, 如图 3-7 所示。

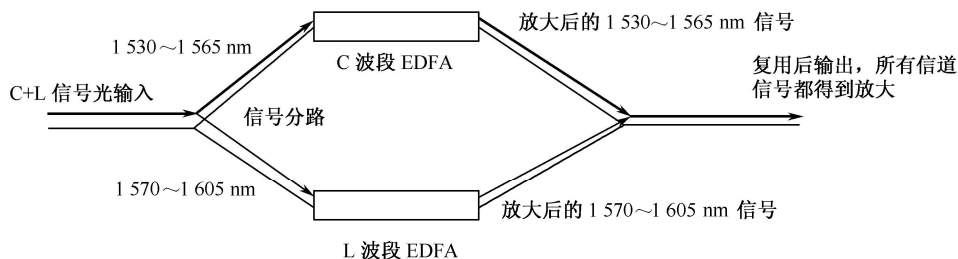


图 3-7 C 波段和 L 波段放大器并联使用

3. EDFA 的增益均衡

EDFA 的带宽对于波分复用系统十分重要，波分复用系统要求被放大的各个信号输出功率相等，对放大器的要求就是要有较宽的增益平坦度。EDFA 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段的带宽为 $30\sim 40\ \text{nm}$ ，将它用于 DWDM 系统时，各信道的波长不同，由于存在增益偏差，经过多级放大之后，增益偏差累积，低放大率信道信号的 SNR 恶化，高放大率信道信号也因光纤非线性效应而使信号特性恶化，最终造成整个系统不能正常工作。因此，要使各个信道的增益偏差处在允许范围内，放大器的增益必须尽可能地平坦。EDFA 实现宽频带和增益平坦度经过了 3 个阶段，如表 3-1 所示。

表 3-1 EDFA 宽带、增益平坦化的进程

进 程 \ 特 征	增益平坦放大波段	关 键 技 术
第一代 1.55 μm 放大波段（一部分）	1 540~1 560 nm 波段	掺铝（Al）、磷（P） 使用改善频带特性的均衡器 构成混合型 EDFA
第二代 1.55 μm 放大波段、全波段	1 530~1 560 nm 波段 (1 525~1 564 nm)	提高光均衡器的性能 长周期光纤光栅 复用法布里-珀罗滤波器 氟化物 EDFA
第三代 EDFA 放大波段、全波段 1.55 μm 放大波段+1.58 μm 放大波段	1 530~1 600 nm 波段	并联型放大器 (1.55 μm 波段+1.58 μm 波段增益平坦型 EDFA) 碲化物 EDFA (+均衡器)

尽管采用上述办法使放大器的性能不断改进，但是越来越长的电再生中继距离不断出现，越来越多的 EDFA 需要级联起来。现在，人们用来解决 EDFA 增益不均衡问题的具体方法是：（1）利用不同类型的光放大器（如喇曼光纤放大器）来均衡 EDFA 的增益；（2）利用光均衡设备的电可调衰减器，单独调节每个波长的光功率。

4. EDFA 的噪声系数

光放大器在放大信号的同时，也向光信号中引入放大的自发辐射光等噪声。EDFA 的噪声主要包括：（1）信号光的散粒噪声；（2）放大的自发辐射光的散粒噪声；（3）自发辐射光谱与信号光之间的差拍噪声；（4）自发辐射光谱间的差拍噪声。

EDFA 的性能主要由噪声自发光噪声所决定。EDFA 的噪声起源于受激铒离子的随机非相干自发辐射。通常，自发辐射可以发生在任何方向，只有位于临界角内的自发辐射部分才会被光纤波导俘获并引起受激辐射，形成放大的自发辐射。

EDFA 的噪声性能用噪声系数 F_n 来衡量，EDFA 的噪声系数除了与自发辐射光的频谱密度和放大器增益相关外，还与输入信号功率、泵浦功率、泵浦方式和泵浦波长等有关。

在输入小信号情况下，EDFA 的噪声系数会随着输入信号光功率的增加而略微减小，而 EDFA 处于饱和状态时，噪声系数会随着信号功率的增加而增大。这是由于受激辐射转换为信号光子的反转粒子数随信号光功率的增加而增多，而供自发辐射放大的反转粒子数相对减少。

EDFA 的噪声系数会随泵浦功率的增加而减小。虽然输出噪声功率随泵浦功率的增大而增加，但是泵浦功率的增大提高了 EDFA 总的信噪比，从而降低了 EDFA 的噪声系数。

EDFA 常用的三种泵浦方式下小信号增益和噪声系数相差不大，原因是三种泵浦方式都能够使整个光纤的铒离子处在完全反转状态，进而使信噪比劣化程度基本相同。然而，当 EDF 长度增长时，同向泵浦方式输出的自发辐射功率最小，因而其噪声系数最小，双向泵浦噪声系数居中，反向泵浦噪声系数最大。

EDFA 的噪声系数与泵浦波长有着密切的关系。980 nm 泵浦激光器采用的是三能级方式，具有比较高的粒子数反转水平和良好的噪声性能，所产生的噪声系数接近于量子极限。（在强泵浦下的三能级系统中， $N_1 \approx 0$ ， $F_n = 3 \text{ dB}$ 是能级反转原理制成光放大器噪声系数的理论极限。）1480 nm 泵浦激光器采用的是两能级方式，粒子数反转水平低，噪声性能比较差，能够产生比较大的功率输出。因此，EDFA 的最佳泵浦方式上采用 980 nm 的同向泵浦和 1480 nm 反向泵浦的双向泵浦，这种方式能够同时得到比较小的噪声系数和足够大的输出功率。

表 3-2 为杭州华泰光纤技术有限公司给出的商业化 EDFA 模块性能参数值，在维护设计过程中可参考。

表 3-2 商业化 EDFA 模块参数值

参 数	功率放大模块	线路放大模块	前置放大模块
波长范围/nm	1 528~1 564	1 528~1 564	1 528~1 564
相关增益/dB	20	20	17
输入光功率/dBm	-24~+4	-24~+4	-17~+3
饱和输出功率/dBm	20	20	10
偏振相关增益/dB	0.5	0.5	0.5
偏振模式色散/ps	0.6	0.6	0.6
噪声系数/dB	5.0	6.0	4.0
增益平坦度/dB	1~0.5	1~0.5	±0.5
工作温度/℃	-5~+65	-5~+65	-5~+65
（输入/输出回损）/dB	40	40	40
（输入/输出泵浦渗漏）/dBm	-30	-30	-30
瞬时响应时间/μs	<200	<100	<100
瞬时过调量/dB	1~1.5	1~1.5	±1.5
尺寸	150 mm×125 mm×22 mm	150 mm×125 mm×22 mm	150 mm×125 mm×22 mm
监控点	input & output		

3.2.4 EDFA 的优缺点

1. EDFA 的优点

- (1) 工作波长与光纤最小衰耗窗口一致;
- (2) 耦合效率高, 易于与光纤耦合连接, 也可采用熔接技术与传输光纤熔接在一起, 衰耗可降至 0.1 dB, 这样的熔接反射衰耗也很小, 不易自激;
- (3) 能量转换效率高, 转换效率能够达 90%以上;
- (4) 增益高, 输出功率大, 增益可达 40 dB, 输出功率在单向泵浦时可达 14 dBm, 双向泵浦时可达 17 dBm, 甚至可达 20 dBm;
- (5) 增益特性不敏感, EDFA 增益对温度不敏感 (在 100℃内增益特性保持稳定), 与中偏振也无关;
- (6) 可实现信号的透明传输, 即在波分复用系统中可同时传输模拟信号和数字信号、高速率信号和低速率信号, 系统扩容时, 可只改动端机而不改动线路。

2. EDFA 的缺点

- (1) 波长固定, 只能放大波长为 1.55 μm 左右的光波, 换用其他基质的光纤时, 钕离子能级也只能发生很小的变化, 可调节的波长有限, 只能换用其他元素;
- (2) 噪声系数偏大, 如此高的噪声系数, 使 EDFA 多级级联后, 降低了接收端的 OSNR, 限制了系统的长距离传输; 单纯使用 EDFA, 对于 $N \times 2.5$ Gb/s 的 WDM 系统, 传输距离不能超过 640 km; 对于 $N \times 10$ Gb/s 的 WDM 系统, 传输距离不能超过 480 km;
- (3) 增益带宽不平坦, 在 WDM 系统中需要采用特殊的手段来进行增益谱补偿。

3.2.5 遥泵技术 (ROPA)

遥泵技术 (remote optical pump amplifier, ROPA) 是专门用于长跨段传输的技术, 主要解决单长跨段传输的 OSNR 受限问题。

因为 EDFA 不仅可对光信号进行放大, 而且还会对噪声进行放大, 再加上 EDFA 本身会产生 ASE 噪声, 所以 EDFA 输入端的信号光功率越小, 其输出端的 OSNR 将会越低。

在进行长跨段传输时, 一般需要在接收端配置 OPA, 目的是对微弱的光信号进行放大, 以达到光接收机对光信号功率的要求。但经过长跨段光纤的传输之后, 其输出端的信号光功率一般是很小的, 即使经过 OPA 放大, 有时也容易造成接收端的 OSNR 达不到要求。

所谓遥泵技术, 就是“遥远地泵浦”, 也就是泵浦源在本地对远端的掺铒光纤进行泵浦, 使 EDF 能够实现信号放大。

首先在长跨段工作光纤的适当位置 (距发送端约 100 km) 融入一段掺铒光纤 EDF, 再在长跨段的发送端或接收端发送一个高功率泵浦光。高功率泵浦光经一段距离的光纤传输后注入到掺铒光纤 EDF 中, 它将激励掺铒光纤使其形成粒子数反转分布, 所以当光信号经工作光纤传输后输入到掺铒光纤时, 就可以发生与 EDFA 放大机理完全相同的光放大现象。

由于泵浦激光器的位置与增益介质 (掺铒光纤) 不在同一个位置, 距离比较遥远, 故称为“遥泵”。遥泵技术明显提高了工作光纤的输出信号光功率, 大大提高了接收端的

OSNR; 但遥泵技术的使用会受到一些条件的限制, 因为需要对线路光纤进行改造。
利用遥泵技术可使单跨段的传输距离达到 400 km。

3.3 光纤喇曼放大器 (FRA)

随着全球信息化脚步的不断加快, 各种通信技术 (如宽带业务综合数据网、ATM 网络、压缩编码高清晰度电视、远程互动教学医疗等) 发展迅速, 使得实际通信业务成倍增长。其结果要求现有的光纤通信网继续增加通信容量, EDFA 仅 40 nm 的放大带宽和几百千米的电再生中继距离, 显然不能满足通信发展的要求, 这样就对光纤通信中的放大器提出了新的要求。光纤喇曼放大器就是在这种情况下, 再次成为光纤通信系统中的研究热点, 特别是最近高功率半导体泵浦激光器的诞生, 又为喇曼光纤放大器 (fiber Raman amplifier, FRA) 的实现奠定了坚实的基础。光纤喇曼放大器由于其自身固有的全波段可放大特性、可利用传输光纤进行在线放大以及优良的噪声特性等优点, 使它的应用得到迅速普及。

3.3.1 FRA 的工作原理

物质内部的分子时刻都在振动着, 但它们只能在某几个固定的频率上振动, 这些频率叫喇曼频率。不同的振动频率对应于不同的分子能量, 当外界光照射时, 外来光子与振动分子发生能量交换, 产生出不同于入射光频率的谱线, 这就是喇曼散射的基本原理。在入射光谱线 (称为母线) 两边出现一些强度很弱的新谱线, 这些新出现的谱线叫伴线, 其中比母线波长长的叫斯托克斯 (Stokes) 线, 比母线波长短的叫反斯托克斯线。它们与母线的频率间隔相等, 其值等于相应的分子振动频率 (十几太赫兹, 对于 SiO_2 晶体为 13.2 THz 左右)。自发喇曼散射的效应很弱, 散射光的强度一般只有入射光强度的百万分之一或亿分之一。

当入射激光功率增加到一定值 (约 500 mW 即 27 dBm) 时, 光纤呈现非线性, 入射激光发生散射, 将一部分入射功率转移到另一个较低的频率, 如果这个低频光与高频光相比的频率偏移量由光纤晶格的振动模式所决定, 这就是光纤中的受激喇曼散射。受激喇曼散射时 Stokes 光显著增强, 其强度甚至可以和入射光功率相比拟, 且具有一定的方向性和相干性。

如果泵浦光和信号光 (信号光波长在泵浦光的喇曼增益带宽内) 通过光耦合器输入光纤, 当这两束光在光纤中一起传输时, 泵浦光的能量通过 SRS 效应转移给信号光, 使信号光得到放大。泵浦光和信号光分别在光纤的两端输入, 在反向传输的过程中同时能够实现弱信号的放大, 这就是光纤喇曼放大器 (FRA) 的工作原理。

利用受激喇曼散射能向较长波长的光转移能量的特点, 适当选择泵浦光的发射波长, 可以实现对光信号的放大。

喇曼散射作为一种非线性效应本来是对系统有害的, 因为它将较短波长的光能量转移到较长波长的光上, 使 WDM 系统的各复用通道的光信号出现不平衡; 但巧妙地利用它可以使泵浦光能量向在光纤中传输的光信号转移, 实现对光信号的放大。

由于喇曼放大器放大光的波长主要取决于泵浦光的发射波长, 所以适当选择泵浦光

的发射波长，就可以使放大范围落入所希望的光波长区域。选择泵浦光波长的原则是：泵浦光波长比要放大的光波长低 70~100 nm。当泵浦光的发射波长选为 1 450 nm 时，可放大 1 550 nm 波长 C 波段的光信号。

3.3.2 FRA 的性能

1. FRA 的增益

在连续波和准连续波的工作条件下，忽略泵浦光消耗，光纤喇曼放大器的增益可由下式表示：

$$G_A = \exp(g_R P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}), \quad L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p} \tag{3-4}$$

式中， g_R 为喇曼增益系数； A_{eff} 为光纤在泵浦波长处的有效面积， $A_{\text{eff}} \approx \pi s_0^2$ ， s_0 为泵浦波长处的模场直径； P_0 为泵浦光功率； α_p 为泵浦光在光纤中的衰减常数。

光信号的喇曼增益与信号光和泵浦光的频率差有密切的关系，当信号光与泵浦光频率差为 13.2 THz 时，喇曼增益达到最大，该频率差对应的信号光波长比泵浦光长 60~100 nm。此外，光信号的喇曼增益还与泵浦光的功率有关。图 3-8 就是泵浦功率分别为 200 mW 和 100 mW 时玻璃的典型喇曼增益曲线。

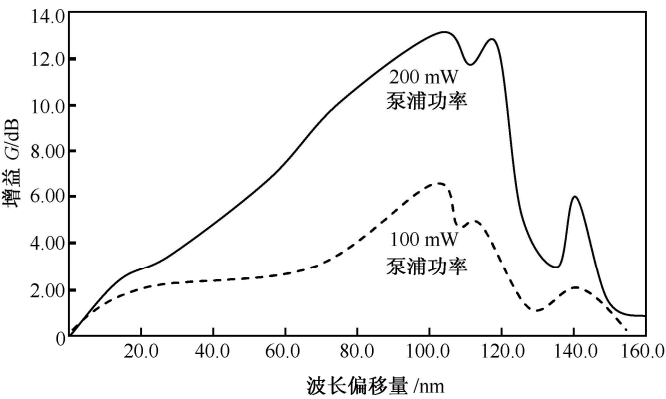


图 3-8 玻璃的典型喇曼增益曲线

2. FRA 的带宽

FRA 的增益带宽由泵浦波长决定，选择适当的泵浦光波长，就可得到任意波长的信号放大。FRA 的增益频谱是每个波长的泵浦光单独产生的增益频谱叠加的结果。所以它由泵浦波长的数量和种类决定。FRA 使用多个泵浦源，可以得到比 EDFA 宽得多的增益带宽，目前增益带宽已达 132 nm，这样通过选择泵浦光波长，就可实现任意波长的光放大，FRA 是目前能唯一实现 1 290~1 660 nm 光谱放大的器件，FRA 可以放大 EDFA 不能放大的波段。

3. 噪声指数

由于喇曼放大是分布式获得增益的过程，描述它的噪声性能必须用等效集中噪声来表征，定义 FRA 的等效集中噪声指数 F_R 为

$$F_R = \frac{\left[\frac{\rho_{ASE}(v)}{h\nu} + 1 \right]}{G_R} \quad (3-5)$$

式中， ρ_{ASE} 是光纤末端放大自发辐射（ASE）密度； G_R 是在光纤末端信号的喇曼增益。因为集中噪声指数（或噪声系数，用 dB 表示）是用数学概念抽象出来的等效噪声指数，所以它可以小于 3 dB，甚至可以是负值。

分布式喇曼放大器经常与 EDFA 混合使用，当作为前置放大器的 FRA 与作为功率放大器的常规 EDFA 混合使用时，其等效噪声指数为：

$$F = F_R + F_E / G_R \quad (3-6)$$

式中， G_R 和 F_R 分别是 FRA 的增益和噪声指数； F_E 是 EDFA 的噪声指数。因为 F_R 通常要比作为功率放大器的 EDFA 的噪声指数 F_E 小，所以由式（3-6）可知，只要增加喇曼增益 G_R ，就可以减少总的噪声指数。比如，一个 10 dB 增益和 -0.5 dB 等效集中噪声指数的前放分布式喇曼放大器和一个 10 dB 增益和 5.5 dB 噪声指数的后放 EDFA 放大器混合使用，则可以获得 20 dB 的总增益和 0.96 dB 的总噪声指数。

FRA 与常规 EDFA 混合使用，在一定增益范围内能有效地降低系统的噪声指数，增加传输跨距。据 Bell 实验室研究表明，40×40 Gb/s 的 WDM 信号在 100 km 上的真波光纤（消水峰光纤）上传输，采用 FRA 可使噪声系数降低 5.9 dB。

4. 安全注意事项

光纤喇曼放大器（FRA）一般有几组不同波长高功率激光器同时泵浦，泵浦总功率甚至超过 30 dBm，所以在使用时特别要注意光缆线路安全、仪表设备安全和人身安全。

（1）目前商用的 FRA 一般都是后向泵浦，泵浦光从信号光的输入端反向输出，这与维护其他常用设备完全不同。

（2）后向泵浦光功率一般很高，超出了机房一般光功率计，包括光谱分析仪的测试范围，不要试图直接测试泵浦光的输出功率。泵浦光波长在光纤里传输衰耗较小，如果喇曼光纤放大器没有断开，100 km 之外的光时域分析仪（OTDR）的光检测器件完全可能被烧毁。

（3）裸眼短时间可容忍的激光功率为 1 mW，400 mW 的漫反射光都可能对人眼造成伤害，无论机房维护还是光缆施工，都不要直视或使用显微镜观察带有激光的光纤端面。

（4）连接喇曼光纤放大器的尾纤端面要求为 APC 或更低反射衰耗端面，而且要保证端面清洁，否则会烧毁尾纤，尾纤的弯曲半径过小同样会烧毁尾纤。

（5）接近 FRA 端至少 25 km 的光缆固定熔接点要求熔接质量良好，否则会烧坏熔接点或者降低喇曼光纤放大器的增益。

3.3.3 FRA 的优缺点

1. FRA 的优点

（1）噪声系数极低。与 EDFA 不同，FRA 的噪声系数非常低，可达 -1 dB 左右，所以可以大大提高接收端的光信噪比 OSNR（4~5 dB）。如此大幅度地提高接收端的 OSNR，可以大大缓解或基本解决 WDM 系统长距离或超长距离传输所面临的难题之一，即接收端 OSNR 受限问题。

- (2) 带宽极宽。因为 FRA 的增益带宽取决于泵浦激光器的波长，所以从理论上讲，FRA 可以对任何波长的光进行放大，即全波段放大。实际上，通过选择适当的泵浦激光器的波长（如使用多个具有不同波长的泵浦激光器），可使 FRA 的增益带宽达到 1 300~1 700 nm，如此宽的带宽，可以用于光纤的整个低损耗区域，这是目前其他放大器根本无法比拟的。
- (3) 可使用工作光纤作为放大介质，降低成本。

2. FRA 的缺点

- (1) 安全性问题，即高光功率注入易损坏系统。1 W 以上的光功率输入到光纤中，如果光连接器的接头表面不干净，很容易把接头烧坏，从而造成整个系统瘫痪，所以使用 FRA 对环境提出了很高的要求。
- (2) 增益具有偏振相关性。FRA 的增益与光的偏振态密切相关，即与泵浦光的偏振态、被放大光信号的偏振态有关。
- (3) 泵浦效率低。FRA 的泵浦效率一般仅为 10%~20%。

3.3.4 FRA 的种类

光纤喇曼放大器（FRA）根据结构可分为分立式喇曼放大器和分布式喇曼放大器两类。

1. 分立式喇曼放大器

分立式喇曼放大器所用的光纤增益介质的长度比较短，泵浦功率要求很高，一般在几瓦到几十瓦，可产生 40 dB 以上的高增益，像 EDFA 一样可用来对光信号进行集中放大，因此主要用于 EDFA 无法放大的波段。允许使用靠近光纤的零色散点窗口，即扩大了光纤的可用窗口。喇曼光纤放大器不但能工作在 EDFA 常使用的 C 波段，而且也能工作在与 C 波段相比较短的 S 波段(1 350~1 450 nm)和较长的 L 波段(1 564~1 620 nm)，完全满足全波光纤对工作窗口的要求。实验发现，色散补偿型光纤是高质量分立式喇曼放大器的最佳选择。如图 3-9 的配置（DCF 与普通光纤 1：7），可实现在进行系统色散补偿的同时对信号进行高增益、低噪声的放大，而且互不影响。

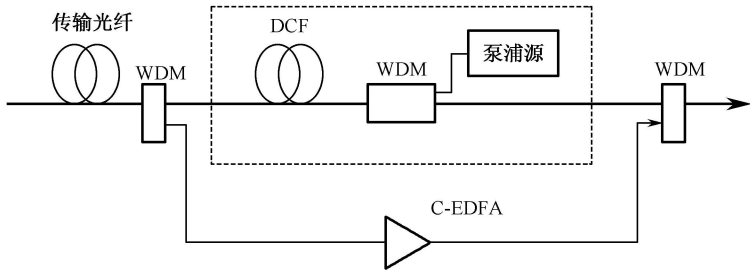


图 3-9 分立式喇曼放大器

2. 分布式喇曼放大器

分布式喇曼放大器（DRA）主要由传输光纤和泵浦光源构成，泵浦光源一般放置在传输设备的发送端或接收端，目前商业应用上用泵浦最多。采用 DRA 技术的传输系统，其典型结构如图 3-10 所示。在 WDM 系统的每个传输单元内，在 EDFA 的输入端注

入反向的喇曼泵浦，信号将会沿光纤实现分布式喇曼放大。由于 DRA 具有噪声低、增益带宽与泵浦波长和功率相关的特点，EDFA 又具有高增益、低成本的特点，所以这种混合放大结构可以同时发挥两种光纤放大器的优势。使用反向泵浦，有利于降低噪声，还有利于避免喇曼放大引起的光纤非线性效应。从目前的技术来看，只有喇曼放大技术才能实现光传输过程中的分布式放大，这一特点使其在现代光纤通信系统中的应用越来越广泛。

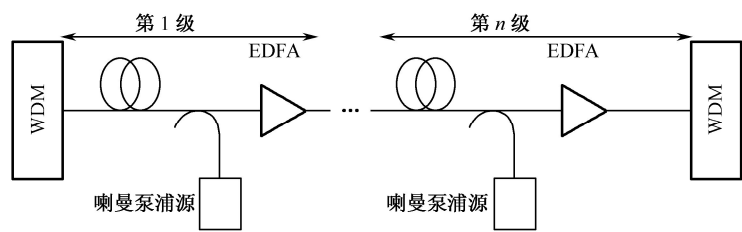


图 3-10 采用 DRA+EDFA 的典型 WDM 系统

3.3.5 喇曼放大技术应用

由于 DRA 的噪声系数一般在 $-1\sim-0.47$ dB 之间。因而，DRA 与 EDFA 组合使用，可明显地提高长距离光纤通信系统的总增益，降低系统的总噪声系数，从而可以扩大系统所能传输的最远距离。康宁公司通过系统模拟和实验验证发现，使用 400 mW 的泵浦功率在 G.652 光纤可获得 13 dB 的增益，能使传输距离扩大 2.5 倍。为了充分发挥 DRA 的优点，还要同时采用色散补偿、增益波动管理/补偿和前向纠错技术。由于 DRA 与 EDFA 的组合使用，扩大了系统传输的距离，从而减少了 3R 中继器的使用数量，降低了系统的成本，可获得更大的商业利润。

DRA 也是现有波分复用系统单信道速率升级到 40 Gb/s 的关键器件。没有 DRA，利用现有的各种光纤，就不可能使 40 Gb/s 速率的波分复用系统的跨距达到 100 km，很有可能还不到 50 km。

表 3-3 所示为近年来一些公司进行的分布式喇曼放大传输试验系统汇总。

表 3-3 分布式喇曼放大传输试验系统汇总

波长数×（速率/ Gb/s）	段数×（跨距/km）	喇曼增益/泵浦功率	说 明	公 司
40×10	5×120	12 dB	第一个 10 Gb/s 的 WDM 系统	Lucent
32×10	80×80	后向 15.3 dB，前向 4.3 dB	间距 50 GHz，DSF 光纤	NTT
8×40	5×80	9 dB/110 mW		NEC
32×40	1×250	1.4 W	最长无中继	Alcatel
82×40	3×100	C 波段 25 dB，L 波段 24 dB		Lucent
128×10	6×140	C 波段 25 dB，L 波段 24 dB		Fujitsu
128×40	3×100	C 波段 25 dB，L 波段 24 dB		Alcatel
211×10	90×80	7 dB	0.64 bit/s/Hz	Fujitsu

第 4 章 WDM 系统传输距离设计

光纤通信长距离传输受到了衰耗和色散两个方面的限制。WDM 系统的光传输设计与单波长 SDH 系统的光传输设计有所不同,除了要考虑衰耗受限、色散受限、偏振模色散受限之外,还要考虑接收端的光信噪比 OSNR,以及非线性效应问题。

4.1 衰耗设计(跨段)

在技术上,系统设计的主要问题是确定中继距离,尤其对长途光纤通信系统,中继距离的设计对系统的性能和经济效益影响很大。工程上常用的设计方法有多种,我国的工程设计基本采用最坏值设计法,即在设计再生段距离时,所有参数(包括光功率、光谱范围、光谱宽度、接收机灵敏度、光纤衰减系数、接头与活动连接器插入衰耗等参数)均采用寿命期中允许的最坏值,可以保证系统在寿命终了(20~25 年)时仍能符合传输性能指标,而实建的光缆和设备性能会高于最坏值,因此,设备的传输系统可能有较多衰耗余量。

最坏值设计法的计算式和参数如下:

$$L(\alpha_f + \alpha_j + M_C) + 2\alpha_c + M_e + A_d \leq P_S - P_R$$
$$L \leq \frac{P_S - P_R - 2\alpha_c - M_e - A_d}{\alpha_f + \alpha_j + M_C} \quad (4-1)$$

式中, P_S 为发送机在 S 点最小平均发送光功率 (dBm); P_R 为接收机在 R 点最差接收灵敏度 (BER=10⁻¹⁰) (dBm); α_c 为每个活动连接器衰耗,通常一个中继段两端各 1 个,每个取衰耗 0.2~0.3 dB,如果没有光分配架 (ODF),此项为零; M_e 为系统设备富余量 (dB),主要是考虑随着使用时间的增加和环境的变化(如环境温度升高)光发射功率和光接收灵敏度会有所下降,以及光纤连接器性能劣化等因素而预留的光功率,一般 M_e 取 3 dB; α_f 为光纤衰耗常数 (dB/km); α_j 为每千米光纤平均接头衰耗 (dB/km),通常取 0.03 dB/km; M_C 为每千米光纤线路衰耗余量,考虑到线路环境的变化、线路可能出现的路由变更、接头的增加和光纤性能的劣化,设计时留有光纤线路衰耗余量,一般 M_C 取 0.1~0.2 dB/km,但一个中继段总富余量不要超过 5 dB; A_d 为光通道代价 (dB); L 为光放段长度。

式 (4-1) 引入了光通道代价的概念,光通道代价是由于脉冲在光纤传输过程中波形的失真导致的接收机灵敏度明显下降。例如,色散对于低速系统虽不会限制中继距离,但它的存在会引起脉冲展宽,从而使波形失真,引起接收机灵敏度下降,严重的引起误码。因此,设计时应考虑光通道的代价。一般对于低色散系统,最大通道代价定义为 1 dB,对于高色散系统 (10 Gb/s 以上速率),允许的最大通道代价为 2 dB。

需要注意的是,上述衰耗受限的设计只是解决了某个跨段的传输距离问题,而不是 WDM 系统再生段的传输距离(合、分波器之间),再生段一般会包括多个跨段。衰耗受

限传输距离的计算一般按跨段进行，即对每个复用通路的每个跨段分别进行衰耗方面的计算，其方法类似于人们熟悉的单波长 SDH 的光功率预算公式，不同的是在式（4-1）中并未考虑光通道代价的影响。光通道代价的影响将放在计算接收端 R_n 的光信噪比（OSNR）时考虑。

从衰耗的角度出发，系统光复用段的距离可以是多个跨段的简单叠加而几乎不受任何限制，但考虑到 OSNR, PMD 等因素的限制，而且主要是考虑受接收端 OSNR 的限制，WDM 系统光复用段的距离不可能无限制地增加，故出现了不同的再生段配置，如 $8 \times 22\text{ dB}$ ， $5 \times 30\text{ dB}$ ， $3 \times 33\text{ dB}$ 。

4.2 色散设计（光复用段）

信号在光纤中传输时，一方面由于线路系统的衰耗，其幅度会越来越小，另一方面会寄生很多噪声，同时由于色散的存在其波形也要发生畸变。幅度减小可以用光放大器来补偿，但是光放大器是将其放大带宽内的所有信号同时放大，而不论其是信号还是噪声，同时它对脉冲波形也没有任何改善，因此不能无限度地增加光放大器，每隔一定的距离必须设立一个电中继器，用以对信号进行再定时、整形、再生，还原出“干净”的规则信号，以进一步延长信号的传输距离。由于 WDM 系统复用通路的传输速率较高，而且光复用段的传输距离又很长（1 000 km 以上），所以 WDM 系统一般为色度色散受限系统。虽然 WDM 系统使用了 EDFA，但并未解决色散受限的问题，因为 EDFA 只是对光信号进行了放大，并不能对光脉冲进行整形处理，所以，色散是限制电中继距离的主要因素。

“101”码组在传输过程中的展宽如图 4-1 所示，发送端输出的是一个规则的“101”码组，由于色散的存在，经长途传送后脉冲将会展宽，两个“1”码出现码间重叠。图中 δ 为码间串扰，当这个串扰等于“1”码幅度的 1/4 时，“101”码组就难免会被判为“111”，发生误码，这个相对值（1/4）就是码间串扰的极限值。造成脉冲展宽的原因很多，主要包括：光纤色散、频率啁啾、抖动、反射等，但光纤色散是引起脉冲展宽最主要的因素。考虑到其他因素，一般将色散引起脉冲展宽产生的码间串扰（ δ ）的容限值设定在相对值 1/5。

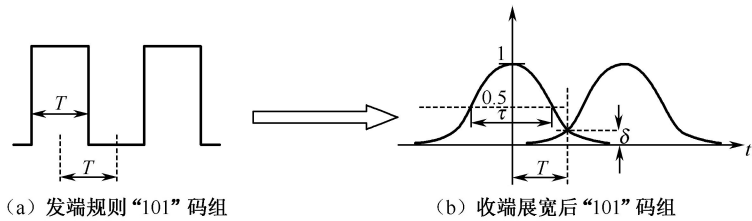


图 4-1 “101”码组在传输过程中的展宽

4.2.1 一般计算公式

根据码间串扰的容限值可以推导出系统的色散限制距离即

$$L = \frac{0.315\ 4\ T}{D_m \cdot \Delta\lambda} = \frac{0.315\ 4}{D_m \cdot \Delta\lambda \cdot f_b} \tag{4-2}$$

式中， D_m 为单模光纤的色散系数，单位为 $\text{ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$ ； $\Delta\lambda$ 为光源的谱线宽度； f_b 为

光通路传送速率, $f_b=1/T$, T 为码元宽度。

由式 (4-2) 可以求出光通道的色散限制距离, 但在实际的工程设计中如果确定了系统代码, 则可以从相应的光接口规范中查找到允许色散 (色散容限, 其单位为 ps/nm), 此时色散限制距离也可以通过 $L=允许色散/光纤色散系数$, 估算得到。

如 $5\times30\text{ dB } 16(8)$ 的主光通道的色散为 $12\,000\text{ ps/nm}$, 如果光纤的色散系数 D_m 为 $17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 则光纤限制距离为 $L=12\,000/17=705.8\text{ (km)}$ 。

显然, 光源的色散容限越大越好, 但光源色散容限的大小取决于复用通路的传输速率与发送端的调制方式, 传输速率越高, 光源的色散容限越小 (大约与传输速率的平方成反比)。

对于复用通路传输速率为 2.5 Gb/s 的系统, 光源的色散容限可以做得比较大, 目前为 $12\,800\text{ ps/nm}$, 能满足一般的需求。它可以进行 640 km ($8\sim22\text{ dB}$) 的长距离传输而不需要进行任何色散补偿, 但超过 640 km , 就需要考虑色散补偿问题。

对于复用通路传输速率为 10 Gb/s 的系统, 光源的色散容限值仅为 $1\,000\text{ ps/nm}$ 左右, 按 G.652 光纤的色散系数为 $17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 计, 最大传输距离仅为 60 km , 所以一般需要进行色度色散补偿。

4.2.2 色散补偿

WDM 系统的色散补偿通常采用色散补偿光纤 DCF, 主要是因为它技术成熟、成本低、工程设施简便, 避免了每个复用通路都要进行色散补偿的麻烦。

每个 DCF 基本模块的色散值约为 -340 ps/nm , 根据传输距离可配置由多个基本模块组成的 DCM。因为 DCF 有一定插损 (约 4 dB), 所以长距离的色散补偿最好分段进行, 避免因采用集中补偿而付出的功率代价过大。

色度色散补偿的一般公式为:

$$\text{色散补偿距离} = \text{传输距离} - \text{光源色散受限距离} + \text{调整量} \quad (\text{km}) \quad (4-3)$$

其中, 调整量一般为 $0\sim30\text{ km}$ 。

例如, 某 400 G ($40\times10\text{ Gb/s}$) WDM 系统的外调制光源色散容限为 800 ps/nm , 收、发间的距离为 95 km , 中间采用 G.652 光纤传输, 其色散系数为 $17\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 如何进行色度色散补偿呢?

因为该系统外调制光源的色散受限传输距离为 $800/17=47\text{ km}$; 取色散补偿调整量为 30 km , 所以, 色散补偿距离为 $95-47+30=78\text{ km}$ 。

4.3 OSNR 设计

4.3.1 光信噪比 OSNR 的含义

WDM 系统光信噪比 OSNR (optical signal to noise ratio) 的含义为: 在满足一定误码率 BER (一般为 1×10^{-12}) 要求的条件下, 复用通路接收端的平均光信号功率与噪声功率之比即

$$\text{OSNR} = 10\log \frac{P_i}{N_i} \quad (4-4)$$

式中, P_i 为第 i 通路的光信号功率 (W); N_i 为第 i 通路在等效噪声带宽 B_m 内的噪声功率 (W), 或:

$$\text{OSNR} = P_i \text{ (dBm)} - N_i \text{ (dBm)} \quad (\text{dB}) \quad (4-5)$$

参数 OSNR 的出现, 是因为 WDM 系统目前承载的都是数字信号, 如 SDH、GE 信号等, 数字通信系统最重要、最基本的技术指标就是误码率 (BER), 而 BER 与光信号功率及噪声功率是密切相关的, 即 OSNR 会直接影响所承载数字通信系统的 BER。

4.3.2 EDFA 的噪声特性

为了实现 WDM 系统的长距离传输, EDFA 的使用是必不可少的。光放大器的应用可以大大地提高系统的可用功率, 增加系统的衰减范围, 延长无中继的传输距离, 它还可以取代一些光/电/光的电中继器, 只进行光/光转换, 减少设备的复杂程度, 提高系统的可靠性。

因为 EDFA 的增益可达 30 dB, 而实现超长距离传输, 总希望多级联地使用 EDFA, 级联的个数越多, 系统的传输距离越长。但 EDFA 不能无限制地级联使用, 因为它具有一定的噪声特性, 一方面, EDFA 在放大光信号的同时, 也发生自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE), 产生自发辐射噪声, 而 ASE 噪声是会逐级积累的, 即本级 EDFA 产生的 ASE 噪声将和光信号一起沿光纤传送到下游的 EDFA, 直到接收端; 另一方面, EDFA 不仅可以对光信号进行放大, 同时也会对 ASE 噪声进行放大。所以 EDFA 级联应用时, 光信号在不断被放大的同时, 从上游 EDFA 传来的 ASE 噪声也会被不断地放大, 从而使系统的信噪比降低。

EDFA 的噪声特性通常用噪声系数 N_F 表征。每个 EDFA 引入 ASE 噪声为

$$N_{\text{ASE}} \text{ (dB)} = 10 \log(h \frac{c^2}{\lambda^3} \Delta \lambda) + N_F \quad (4-6)$$

式中, h 为普朗克常数; $C = 2.997\,925 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速; N_F 为光放大器的噪声系数; $\Delta \lambda$ 滤波器带宽, 取 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}$, 代入式 (4-6) 得:

$$N_{\text{ASE}} \text{ (dB)} = -58.03 \text{ dBm} + N_F \quad (\text{dB}) \quad (4-7)$$

EDFA 的噪声系数 N_F 越大 (一般在 5~7 dB 范围), 说明其输出端的光信号与噪声功率之比越小, 即输出光信号的质量越差, 而 EDFA 级联的数量过多, 在接收端积累的噪声会很大, 若积累的 ASE 噪声功率超过一定限度, 将使接收端的光信号性能劣化, 最终导致误码增加, 即出现所谓 OSNR 受限。一般地, 如果有 9 个以上的 EDFA 级联使用, 接收端的 OSNR 可能低于 25 dB, 具体还与发送光功率、跨段长度等有关。

4.3.3 理想系统的 OSNR 计算

所谓理想系统是指系统中合、分波器之间的各跨段的衰减 L 皆相等, 所以 EDFA 的特性都一致即增益 G 、噪声系数 N_F 都一样, 而且光放大器的增益 G 刚好等于跨段的衰减 L 。

经过 N 个光放大段传输, 由于各个 EDFA 具有相同的特性, 因此, 噪声线性叠加, 即

$$N_{\text{ASE}} \text{ (dB)} = -58.03 \text{ dBm} + N_F \text{ (dB)} + 10 \log N \quad (4-8)$$

式 (4-8) 中的 N_{ASE} (dB) 就是式 (4-4) 中的 N_i 。

对于各路功率都相等的 M 路多信道系统 (单信道系统 $M=1$)，假设总的入纤功率为 P_{out} (dBm)，则每路的入纤功率 (P_i) 为 $P_{out}-10\lg M$ 。假设任意两个光放大器的衰耗都是 L dB (包括连接器和接头衰耗)，则接收机的输入端信号功率 (P_{Rn} dBm) 为

$$P_{Rn} = P_{out} - 10\log M - L \tag{4-9}$$

则光信噪比 OSNR 为

$$OSNR = P_{out} - 10\log M - L + 58.03 - N_F - 10\log N \tag{4-10}$$

式中， P_{out} 为入纤光功率 (dBm)； M 为 WDM 系统的复用通路数； L 为任意两个 EDFA 之间的衰耗即跨段衰耗 (dB)； N_F 为 EDFA 的噪声系数 (dB)； N 为 WDM 系统合、分波器之间的级联光放大器个数。

如果已知系统要求的 OSNR，根据式 (4-10) 可以求出允许的最大光放大段数 N ；如果知道了光放大段数，利用式 (4-10) 也可以验证系统的 OSNR 是否符合要求。

从式 (4-10) 可以看出，跨段衰耗 L 对 OSNR 的影响比跨段数 N 要大得多，因为式中的跨段衰耗 L 是直接影响 OSNR，而跨段数 N 则是取对数之后才影响 OSNR。这也可以从系统配置的指标要求反映出来， 8×22 dB 配置的传输距离为 $8\times 80=640$ km，而 3×33 dB 配置的传输距离只有 $3\times 120=360$ km，但它们的 OSNR 要求是基本一样的 (20 dB 左右)，其原因是后者的跨段衰耗 L 比较大。

例 1：一个 4×10 Gb/s 的 WDM 系统，入纤光功率 $P_{out}=21$ dBm， $M=40$ ，系统配置为 8×22 dB (640 km) 即 EDFA 级联个数 $N=9$ ，跨段衰耗 $L=22$ dB，EDFA 的噪声系数 $N_F=6$ dB。

把以上数据代入式 (4-10) 可得：

$$OSNR = 21 - 10\log 40 - 22 + 58.03 - 6 - 10\log 9 = 25 \text{ dB}$$

如果其他条件不变，仅系统配置改为 3×33 dB (360 km)，则有：

$$OSNR = 21 - 10\log 40 - 33 + 58.03 - 6 - 10\log 4 = 18 \text{ dB}$$

从以上计算可以看出，跨段衰耗 L 比跨段数 N 对 OSNR 的影响要大得多。

4.3.4 通用系统的 OSNR 计算

上述理想化的 WDM 系统，在实际应用中是不存在的，因为一般 WDM 系统中各跨段的衰耗 (长度) 不可能一样，各 EDFA 的特性 (增益 G 、噪声系数 N_F 等) 也不会完全一致，而且 EDFA 的增益 G 也不会恰好等于跨段的衰耗 L 。

包括 N 个级联应用的 EDFA 的 WDM 系统模型如图 4-2 所示。

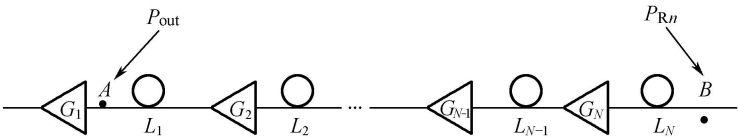


图 4-2 含 N 个级联 EDFA 的 WDM 系统模型

图中， P_{out} 为第一个光放大器的光信号输出功率 (dBm)； P_{Rn} 为到达接收端 R_n 点的光信号功率 (dBm)； G_N 为第 N 个 EDFA 的增益 (dB)； L_N 为第 N 段光纤的衰

耗 (dB)。

上图中的 A 点相当于图 1-8 中的 MPI-S 点, B 点则相当于 MPI-R 点。

一般系统的 OSNR 计算过程如下:

1) 计算每个 EDFA 产生的 ASE 噪声功率 P_{ASEi}

一个 EDFA 在每个复用光通道产生的 ASE 噪声功率为:

$$P_{ASEi} = N_{Fi} + G_i - 58 \quad (\text{dBm}) \quad (4-11)$$

式中, N_{Fi} 与 G_i 分别为第 i 个 EDFA 的噪声系数与增益 (dB)。

2) 计算 n 个 EDFA 的 ASE 噪声功率在 R_n 点的积累 P_{ASE}'

系统中 n 个 EDFA 在 R_n 点的累积噪声功率为:

$$\begin{aligned} P_{ASE}' &= \text{EDFA1 在 } R_n \text{ 点的累积噪声功率} + \text{EDFA2 在 } R_n \text{ 点的累积噪声功率} + \cdots + \\ &\quad \text{EDFAn 在 } R_n \text{ 点的累积噪声功率} \quad (4-12) \\ &= 10^{0.1(P_{ASE1} - L_1 + G_2 - L_2 + G_3 - \cdots - L_{n-1} + G_n)} + 10^{0.1(P_{ASE2} - L_2 + G_3 - L_3 + G_4 - \cdots - L_{n-1} + G_n)} + \\ &\quad L + 10^{0.1(P_{ASEn-1} - L_{n-1} + G_n)} + 10^{0.1P_{ASEn}} \end{aligned}$$

式中, $10^{0.1x}$ 是把以 dBm 表示的 x 换算成以 mW 表示的形式; $P_{ASE1}, P_{ASE2}, \cdots, P_{ASEn}$ 分别是第 1, 2, \cdots, n 个 EDFA 产生的自发辐射噪声功率 (dBm), 其值可用式 (4-11) 分别算出; $L_1, L_2, \cdots, L_{n-1}$ 分别是第 1, 2, $\cdots, (n-1)$ 个区段的衰耗 (dB); G_1, G_2, \cdots, G_n 分别是第 1, 2, \cdots, n 个 EDFA 增益 (dB)。

3) 把 P_{ASE}' 换算成以 dBm 表示的形式

为方便光信噪比的计算, 需要再把式 (4-12) 的计算结果换算成以 dBm 表示的形式, 即

$$P_{ASE} = 10 \lg P_{ASE}' \quad (\text{dBm}) \quad (4-13)$$

4) 计算 R_n 点的光信号功率 P_{Rn}

第一个 EDFA 的总输出光功率 P_{out} (dBm), 经过 $n-1$ 个区段的衰减和后面 $n-1$ 个光放大器的放大之后, 到达 R_n 点的光信号功率为:

$$P_{Rn} = P_{\text{out}} - 10 \lg M - L_1 + G_2 - L_2 + G_3 - \cdots - L_{n-1} + G_n \quad (\text{dBm}) \quad (4-14)$$

式中, M 为 WDM 系统的复用通道数。

5) 计算 R_n 点的 OSNR

由式 (4-13)、式 (4-14) 可得 R_n 点的光信噪比为:

$$\text{OSNR} = P_{Rn} - P_{ASE} \quad (\text{dB}) \quad (4-15)$$

例 2: 一个 40×2.5 Gb/s 的 WDM 系统, 共有 3 个跨段, 其跨段衰耗分别为 $L_1=22$ dB, $L_2=31$ dB, $L_3=24$ dB; 系统包括 4 个 EDFA, 其增益分别为 $G_1=21$ dB, $G_2=23$ dB, $G_3=24$ dB, $G_4=23$ dB; 其噪声系数为 $N_{F1}=5.2$ dB, $N_{F2}=5.3$ dB, $N_{F3}=5.4$ dB, $N_{F4}=5.1$ dB; 入纤光功率即第一个 EDFA 的总输出光功率 $P_{\text{out}}=21$ dBm。求 R_n 点的 OSNR。

计算过程如下:

1) 计算每个 EDFA 产生的 ASE 噪声功率 P_{ASEi}

用式 (4-11) 分别求出 4 个 EDFA 的自发辐射噪声功率, 即

$$P_{ASE1}=N_{F1}+G_1-58=5.2+21-58=-31.8 \text{ (dBm)};$$

$$P_{ASE2}=N_{F2}+G_2-58=5.3+22-58=-30.7 \text{ (dBm)};$$

$$P_{ASE3}=N_{F3}+G_3-58=5.4+24-58=-28.6 \text{ (dBm)};$$

$$P_{ASE4}=N_{F4}+G_4-58=5.1+23-58=-29.9 \text{ (dBm)}.$$

2) 计算 4 个 EDFA 的 ASE 噪声功率在 R_n 点的积累 P_{ASE}'

由式 (4-12) 可得:

$$\begin{aligned} P_{ASE}' &= 10^{0.1(-31.8-22+22-31+24-24+23)} + 10^{0.1(-30.7-31+24-24+23)} + 10^{0.1(-28.6-24+23)} \\ &\quad + 10^{0.1(-29.9)} \\ &= 10^{-3.98} + 10^{-3.87} + 10^{-2.96} + 10^{-2.99} \\ &= 0.10 \times 10^{-3} + 0.13 \times 10^{-3} + 1.10 \times 10^{-3} + 1.02 \times 10^{-3} \\ &= 2.35 \times 10^{-3} \text{ (mW)} \end{aligned}$$

3) 把 P_{ASE}' 换算成以 dBm 表示的形式

代入式 (4-13) 得:

$$P_{ASE}=10\lg P_{ASE}' = 10\lg (2.35 \times 10^{-3}) = -26.3 \text{ (dBm)}$$

4) 计算 R_n 点的光信号功率 P_{Rn}

用式 (4-14) 计算出 R_n 点的光信号功率:

$$\begin{aligned} P_{Rn} &= P_{out} - 10\lg M - L_1 + G_2 - L_2 + G_3 - L_3 + G_4 \\ &= 21 - 10\lg 40 - 22 + 22 - 31 + 24 - 24 + 23 \\ &= -3 \text{ (dBm)} \end{aligned}$$

5) 计算 R_n 点的 OSNR

由式 (4-15) 得:

$$OSNR = P_{Rn} - P_{ASE} = -3 - (-26.3) = 23.3 \text{ (dB)}$$

总之, 影响接收端 OSNR 的因素有发送光功率、复用通路数、跨段衰耗 L 、光放大器级联个数 N 、光放大器的噪声系数 N_F 等, 但归根结底与系统的传输距离密切相关。一般来讲, 复用通路速率为 2.5 Gb/s 的 WDM 系统, 传输距离大于 640 km 时可能会出现 OSNR 受限, 即 $OSNR < 26 \text{ dB}$; 复用通路速率为 10 Gb/s 的 WDM 系统, 传输距离大于 480 km 时可能会出现 OSNR 受限, 即 $OSNR < 20 \text{ dB}$ 。

克服 OSNR 受限有几种方法: (1) 使用低噪声系数喇曼光放大器, 它可以使接收端的光信噪比提高 4~5 dB; (2) 在电路层对信号进行数字处理, 如采用前向纠错 FEC 编码, 可以降低 OSNR 容限 3~5 dB; (3) 采用遥泵技术(主要用于提高单长跨段的 OSNR); (4) 当复用通路传输速率在 10 Gb/s 以上时, 采用 RZ 编码技术降低 OSNR 容限。当上述方法都不能使 OSNR 满足要求时, 只能增设 REG。

4.4 BER 的计算

由上所述, OSNR 直接影响 WDM 系统复用通路的 BER, 但 OSNR 与 BER 之间的关系是一种比较复杂的隐含关系, 不能用简洁的数学表达式来表示。一般地, 只要知道了光接收端 R_n 点的光信噪比 OSNR 与输入光功率 P_{Rn} , 经过烦琐的数学计算, 就可以得

到该通路的 BER。需要注意的是，在计算 BER 时，要考虑系统余量与代价。因为伴随时间的推移，组成 WDM 系统的各部分的性能要发生老化，如光纤的衰耗、光源的发送功率、光放大器 EDFA 的增益与噪声系数等都会发生不同程度的老化，它们都会导致接收端的 OSNR 降低，进而会降低系统的误码率，所以在系统设计的初期应该考虑 OSNR 的余量问题，一般可取 3~5 dB。

第 5 章 WDM 标准及测试

5.1 相关技术标准

5.1.1 系统工作波长及分配

1. 系统工作波长区

石英光纤有两个低衰耗窗口，即 1 310 nm 波长区与 1 550 nm 波长区，但由于目前常用的掺铒光纤放大器的工作范围为 1 530~1 565 nm，因此大规模商用的光波分复用系统皆工作在 1 550 nm 窗口。石英光纤在 1 550 nm 波长区有三个波段可以使用，即 S 波段、C 波段与 L 波段。S 波段又称为短波长波段，其波长范围为 1 460~1 528 nm；C 波段又称为常规波段，其波长范围为 1 530~1 565 nm；L 波段又称为长波长波段，其波长范围为 1 565~1 625 nm，如图 5-1 所示。

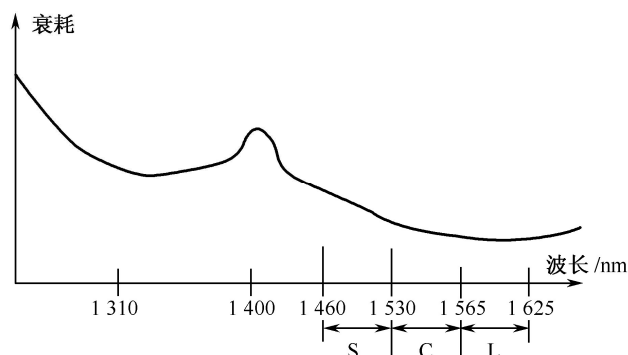


图 5-1 光纤 1 550 nm 波长区的 3 个波段

要想把众多的光波长通路信号进行复用，必须对各光通路信号的工作波长进行严格规范，否则系统会发生混乱，合波器与分波器也难以正常工作。因此在有限的波长区内如何有效地进行通道分配，关系到是否能够提高带宽资源的利用率和减少通道彼此之间的非线性影响。

与一般单波长系统不同的是，WDM 系统通常用频率来表示其工作范围。这是因为用频率比用光波长更准确、方便。光工作波长 λ 与工作频率 ν 的关系为：

$$\lambda = c/\nu \tag{5-1}$$

式中， c 为光在真空中的传播速度，且 $c=2.997\,924\,58\times10^8$ m/s。

2. 绝对频率参考 AFR

绝对频率参考 AFR 是指 WDM 系统标称中心频率的绝对参考点。用绝对参考频率加上规定的通道间隔就是各复用光通路的中心工作频率（中心波长）。

G.692 建议规定，WDM 系统的 AFR 为 193.1 THz，与之相对应的光波长为 1 552.52nm。AFR 的精确度是指 AFR 信号相对于理想频率的长期频率偏移。AFR 的稳定度是指包括温度、湿度和其他环境条件变化可能引起的频率变化，正在研究之中。

3. 通路间隔

所谓通路间隔，是指两个相邻光波长复用通路的标称中心工作频率之差。通路间隔可以是均匀的，也可以是非均匀的。非均匀通路间隔可以比较有效地抑制 G.653 光纤的四波混频效应（FWM），但目前大部分还是采用均匀通路间隔。

一般来讲，通路间隔应是 100 GHz（约 0.08 nm）的整数倍，即为 100 GHz 或 200 GHz。但伴随技术的发展与对通信容量日益增长的需求，50 GHz 的通路间隔已经开始使用。

目前，基于 C 波段的 16 波、32 波或 40 波 WDM 系统采用 100 GHz 通路间隔，而基于 C 波段的 80 波 WDM 系统，以及 1.6 Tb/s 系统（C 波段 80 波，L 波段 80 波）则采用 50 GHz 通路间隔。

4. 标称中心工作频率

为了保证不同 WDM 系统之间的横向兼容性，必须对各个通路的中心频率进行规范，所谓标称中心工作频率是指 WDM 系统中每个波长复用通路对应的中心工作波长（频率）。

在 G.692 建议中，通路的中心工作频率是基于 AFR 为 193.1 THz、最小通路间隔为 100 GHz 的频率间隔系列，所以对其选择应满足几方面要求。

1) 至少提供 16 个波长

这样可保证当复用通路信号为 10 Gb/s 时，系统的总传输容量可以达到 160 Gb/s 以上的水平，但波长的数量也不宜过多，因为对众多波长的监控是一个相当复杂而又较难应付的问题。

2) 工作波长应位于光放大器增益的平坦部分

光放大器可对每个波长通路提供相对均匀的增益，有利于系统的设计和超长距离传输的实现。对于 EDFA 而言，其增益曲线比较平坦的部分为 1 540~1 560 nm。

3) 波长应该与光放大器的泵浦波长无关

在同一个系统中允许使用 980 nm 泵浦的光放大器和 1 480 nm 泵浦的光放大器。

表 5-1 所示为在 1 528~1 561 nm 之间，以 50 GHz 和 100 GHz 为通路间隔的标称中心频率表。

由表 5-1 可见，用频率表示比用波长表示要方便得多。用频率表示，只需要把已知的复用光通路标称中心工作频率加上通路间隔 0.05 THz（50 GHz），就可以得到新的复用光通路标称中心工作频率。但若用波长表示，则需要把已知的复用光通路工作波长加上 0.4 nm 或 0.39 nm，要麻烦一些，因为 0.05 THz 并非精确地对应于 0.4 nm。

表 5-1 标称中心频率表

间隔为 50 GHz 的标称中心频率/THz	间隔为 100 GHz 及以上的标称中心频率/THz	标称中心波长/nm
196.10	196.10	1 528.77
196.05	—	1 529.16
196.00	196.00	1 529.55
195.95	—	1 529.94
195.90	195.90	1 530.33
195.85	—	1 530.72
195.80	195.80	1 531.12
195.75	—	1 531.51
195.70	195.70	1 531.90
195.65	—	1 532.29
195.60	195.60	1 532.68
195.55	—	1 533.07
195.50	195.50	1 533.47
195.45	—	1 533.86
195.40	195.40	1 534.25
195.35	—	1 534.64
195.30	195.30	1 535.04
195.25	—	1 535.43
195.20	195.20	1 535.82
195.15	—	1 536.22
195.10	195.10	1 536.61
195.05	—	1 537.00
195.00	195.00	1 537.40
194.95	—	1 537.79
194.90	194.90	1 538.19
194.85	—	1 538.58
194.80	194.80	1 538.98
194.75	—	1 539.37
194.70	194.70	1 539.77
194.65	—	1 540.16
194.60	194.60	1 540.56
194.55	—	1 540.95
194.50	194.50	1 541.35
194.45	—	1 541.75
194.40	194.40	1 542.14
194.35	—	1 542.54
194.30	194.30	1 542.94
194.25	—	1 543.33
194.20	194.20	1 543.73
194.15	—	1 544.13

(续表)

间隔为 50 GHz 的标称中心频率/THz	间隔为 100 GHz 及以上的标称中心频率/THz	标称中心波长/nm
194.10	194.10	1 544.53
194.05	—	1 544.92
194.00	194.00	1 545.32
193.95	—	1 545.72
193.90	193.90	1 546.12
193.85	—	1 546.52
193.80	193.80	1 546.92
193.75	—	1 547.32
193.70	193.70	1 547.72
193.65	—	548.11
193.60	193.60	1 548.51
193.55	—	1 548.91
193.50	193.50	1 549.32
193.45	—	1 549.72
193.40	193.40	1 550.12
193.35	—	1 550.52
193.30	193.30	1 550.92
193.25	—	1 551.32
193.20	193.20	1 551.72
193.15	—	1 552.12
193.10	193.10	1 552.52
193.05	—	1 552.93
193.00	193.00	1 553.33
192.95	—	1 553.73
192.90	192.90	1 554.13
192.85	—	1 554.54
192.80	192.80	1 554.94
192.75	—	1 555.34
192.70	192.70	1 555.75
192.65	—	1 556.15
192.60	192.60	1 556.55
192.55	—	1 556.96
192.50	192.50	1 557.36
192.45	—	1 557.77
192.40	192.40	1 558.17
192.35	—	1 558.58
192.30	192.30	1 558.98
192.25	—	1 559.39
192.20	192.20	1 559.79
192.15	—	1 560.20
192.10	192.10	1 560.61

5. 通路分配表

16 通路 WDM 系统的 16 个光通路的中心频率应满足如表 5-2 所示的要求，8 通路 WDM 系统的 8 个光通路的中心波长应选表 5-2 中标有*的波长。

表 5-2 16 通路和 8 通路 WDM 系统中心频率

序号	中心频率/THz	波长/nm	序号	中心频率/THz	波长/nm
1	192.10	1 560.61*	9	192.90	1 554.13*
2	192.20	1 559.79	10	193.00	1 553.33
3	192.30	1 558.98*	11	193.10	1 552.52*
4	192.40	1 558.17	12	193.20	1 551.72
5	192.510	1 557.36*	13	193.30	1 550.92*
6	192.60	1 556.55	14	193.40	1 550.12
7	192.70	1 555.75*	15	193.50	1 549.32*
8	192.80	1 554.94	16	193.60	1 548.51

32 通路 WDM 系统的 32 个光通路的中心频率有两种选择方案：一种是连续的频带方案，也就是说，这 32 个波长在同一个频带内，且采取的是间隔均匀、连续的频带分配方案；另一种是分别在两个频带内的分离频带分配方案，一般来说是分别在红带和蓝带内安排 16 个波长，中间留有一定的保护频带。

连续频带方案：采取连续波的 32 通路 WDM 系统是基于近年来掺铒光纤放大器（EDFA）技术的迅速发展，EDFA 的增益平坦度和平坦输出范围都有了很大提高。采用这种方案的 WDM 系统的中心频率应满足表 5-3 所示的要求。

表 5-3 32 通路 WDM 系统连续频带中心频率

序号	中心频率/THz	波长/nm	序号	中心频率/THz	波长/nm
1	192.10	1 560.61	17	193.70	1 547.72
2	192.20	1 559.79	18	193.80	1 546.92
3	192.30	1 558.98	19	193.90	1 546.12
4	192.40	1 558.17	20	194.00	1 545.32
5	192.510	1 557.36	21	194.10	1 544.53
6	192.60	1 556.55	22	194.20	1 543.73
7	192.70	1 555.75	23	194.30	1 542.94
8	192.80	1 554.94	24	194.40	1 542.14
9	192.90	1 554.13	25	194.50	1 541.35
10	193.00	1 553.33	26	194.60	1 540.56
11	193.10	1 552.52	27	194.70	1 539.77
12	193.20	1 551.72	28	194.80	1 538.98
13	193.30	1 550.92	29	194.90	1 538.19
14	193.40	1 550.12	30	195.00	1 537.40
15	193.50	1 549.32	31	195.10	1 536.61
16	193.60	1 548.51	32	195.20	1 535.82

分离频带方案：分离频带方案的 32 通路 WDM 系统分蓝带和红带两个频带，每个频带中安排 16 个波长，它将现有的频带分为两部分，适于在单根光纤上分别用这两个频带的信号传送两个方向的光信号。采用这种方案的 WDM 系统的中心频率应满足表 5-4 的要求。

表 5-4 32 通路 WDM 系统分离频带中心频率

序号	频带	中心频率/THz	波长/nm	序号	频带	中心频率/THz	波长/nm
1	红带	192.10	1 560.61*	17	蓝带	194.50	1 541.35
2		192.20	1 559.79	18		194.60	1 540.56
3		192.30	1 558.98*	19		194.70	1 539.77
4		192.40	1 558.17	20		194.80	1 538.98
5		192.510	1 557.36*	21		194.90	1 538.19
6		192.60	1 556.55	22		195.00	1 537.40
7		192.70	1 555.75*	23		195.10	1 536.61
8		192.80	1 554.94	24		195.20	1 535.82
9		192.90	1 554.13*	25		195.30	1 535.04
10		193.00	1 553.33	26		195.40	1 534.25
11		193.10	1 552.52*	27		195.50	1 533.47
12		193.20	1 551.72	28		195.60	1 532.68
13		193.30	1 550.92*	29		195.70	1 531.90
14		193.40	1 550.12	30		195.80	1 531.12
15		193.50	1 549.32*	31		195.90	1 530.33
16		193.60	1 548.51	32		196.00	1 529.55

6. 中心频率偏移

中心频率偏移是指复用光通路的实际中心工作频率与标称中心工作频率之间的允许偏差。由于 32 通路/16 通路 WDM 系统的通道间隔为 100 GHz，最大中心频率偏移为 ±20 GHz（约 0.16 nm）。对于 8 通路 WDM 系统，采用均匀间隔 200 GHz（约 1.6 nm）作为通路间隔，而且为了未来向 16 通路系统升级，规定对应的最大中心频率偏差为 ±20 GHz（约 0.16 nm）。这些偏差值均为寿命终了值，即在系统设计寿命终了时，考虑到温度、湿度等各种因素仍能满足的数值。

注意，通路间隔和频偏的频率与波长换算不能使用式（5-1），因为该式是频率和波长绝对值之间的换算。

频率差Δν与波长差Δλ的关系应如下式：

$$\Delta \nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

(5-2)

式中，c 为光在真空中的传播速度，c=2.997 924 58×10⁸ m/s。

5.1.2 主要性能指标

在波分复用系统的验收、开通和维护过程中，为了保证传输系统的质量，必然要进行波分复用系统的测试，测试结果必须通过指标来衡量。

1. 波分复用器指标

表 5-5 和表 5-6 分别列出了 WDM 系统对合波器和分波器的性能要求。

表 5-5 合波器参数要求

项 目	单位	8 通路	16 通路	32 通路	
				波长敏感型	波长不敏感型
插入损耗	dB	<11	<14	<12	<17
光反射系数	dB	<-30	<-30	<-40	<-40
工作波长范围	nm	1 530~1 561	1 530~1 561	1 530~1 561	1 530~1 561
偏振相关损耗	dB	<0.5	<0.5	<0.5	—
相邻通路隔离度	dB			>22	—
非相邻通路隔离度	dB			>25	—
各通路插损最大差异	dB	<3	<3	<3	<3

表 5-6 分波器参数要求

项 目	单位	8 通路	16 通路	32 通路
通路间隔	GHz	200	100	100
插入损耗	dB	<11	<11	<10
光反射系数	dB	*	*	<-30
偏振相关损耗	dB	<0.5	<0.5	<0.5
相邻通路隔离度	dB	>25	>25	>25
非相邻通路隔离度	dB	>25	>25	>25
各通路插损最大差异	dB	<3	<3	<3

注：*为待研究。

2. 光放大器指标

表 5-7、表 5-8 和表 5-9 分别列出了 WDM 系统对光功率放大器、光前置放大器、光线路放大器的性能要求。

表 5-7 光功率放大器的主要参数性能指标

项 目	单位	8 通路系统指标			16 通路系统指标			32 通路系统指标		
		8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
总输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
噪声系数	dB	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<7	<7	<7
通路输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
通路输出功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
输入反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
输出反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
最大总输出功率	dBm	*	*	*	*	*	*	17（见注释）	20	20

(续表)

项 目	单位	8 通路系统指标			16 通路系统指标			32 通路系统指标		
		8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
通路增加/移去的增益响应（稳态）	ms	*	*	*	*	*	*	<10	<10	<10
通路增益	dB	*	*	*	*	*	*	20-25	*	*
增益平坦度	dB	*	*	*	*	*	*	±1	±1	±1
增益斜度	dB/dB	*	*	*	*	*	*	<2	<2	<2
偏振相关损耗	dB	*	*	*	*	*	*	<0.5	<0.5	<0.5

注：特殊情况时可为 20 dB；* 为待研究。

表 5-8 光前置放大器的主要参数性能指标

项 目	单位	8 通路系统指标			16 通路系统指标			32 通路系统指标		
		8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
总输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
噪声系数	dB	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5
通路输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
通路输出功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
输入反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
输出反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
最大总输出功率	dBm	*	*	*	*	*	*	15	15	15
通路增加/移去的增益响应（稳态）	ms	*	*	*	*	*	*	<10	<10	<10
通路增益	dB	*	*	*	*	*	*	20—25	*	*
增益平坦度	dB	*	*	*	*	*	*	±1	±1	±1
增益斜度	dB/ dB	*	*	*	*	*	*	<2	<2	<2
偏振相关损耗	dB	*	*	*	*	*	*	<0.5	<0.5	<0.5

注：* 为待研究。

表 5-9 光线路放大器的主要参数性能指标

项 目	单位	8 通路系统指标			16 通路系统指标			32 通路系统指标		
		8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
总输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
噪声系数	dB	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<6.5	<6.5	<6.5
通路输入功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
通路输出功率范围	dBm	*	*	*	*	*	*	*	*	*
输入反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
输出反射系数	dB	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
最大总输出功率	dBm	*	*	*	*	*	*	17（见注释）	20	20

(续表)

项 目	单位	8 通路系统指标			16 通路系统指标			32 通路系统指标		
		8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
通路增加/移去的增益响应（稳态）	ms	*	*	*	*	*	*	<10	<10	<10
通路增益	dB	*	*	*	*	*	*	20~25	*	*
增益平坦度	dB	*	*	*	*	*	*	±1	±1	±1
增益斜度	dB/ dB	*	*	*	*	*	*	<2	<2	<2
偏振相关损耗	dB	*	*	*	*	*	*	<0.5	<0.5	<0.5

注：特殊情况时可为 20 dB；* 为待研究。

3. 波长转换器指标

1) 发送端的 OTU

位于具有 G.957 接口 SDH 设备的后面，OTU 输出为标准波长。发送端 OTU 接口主要参数指标如表 5-10 所示。

表 5-10 发送端 OTU 接口主要参数指标

项 目		单 位	指 标
OTU 的输入端 S 点参数要求	接收机灵敏度*	dBm	-18
	接收机反射	dB	<-27
	过载功率	dBm	0
	输入信号波长区	nm	1 280~1 565
OTU 的输出端 S _n 点参数要求	最大-20 dB 谱宽	nm	0.2
	最小边模抑制比	dB	+35
	标称中心频率	THz	192.1~193.5
	中心频率偏移	GHz	≤±20
	最大平均发送功率	dBm	0
	最小平均发送功率	dBm	-10
	最小消光比	dB	+10
	色散容限值**	ps/nm	12 800/12 000/7 200

注：* 在某些情况下可以适当放松；

** 色散容限值与选用的系统类型有关，如 8×22 dB 为 12 800 ps/nm，5×30 dB 为 12 000 ps/nm，3×33 dB 为 7 200 ps/nm，与复用波长数目无关。

2) 再生中继器的 OTU

作为再生中继器的 OTU 除执行 3R 中继，完成光—电—光转换外，还需要具有对某些再生段开销字节进行监视的功能，至少包括再生段误码监测 B1 字节的监测。

再生中继器 OTU 接口主要参数指标如表 5-11 所示。

3) 接收端的 OTU

位于具有 G.957 接口 SDH 接收机的前面，OTU 输出为符合 G.957 输出特性的光信

号。接收端 OTU 接口主要参数指标如表 5-12 所示。

表 5-11 再生中继器 OTU 接口主要参数指标

项 目		单 位	指 标
OTU 的输入 端 S 点参数 要求	接收机灵敏度*	dBm	-25
	接收机反射	dB	<-27
	过载功率	dBm	-9
	输入信号波长区	nm	1 280~1 565
OTU 的输出 端 S _n 点参数 要求	最大-20dB 谱宽	nm	0.2
	最小边模抑制比	dB	+35
	标称中心频率	THz	192.1~193.5
	中心频率偏移	GHz	≤±20
	最大平均发送功率	dBm	0
	最小平均发送功率	dBm	-10
	最小消光比	dB	+10
	色散容限值**	ps/nm	12 800/12 000/7 200

注：* 在某些情况下可以适当放松；
** 色散容限值与选用的系统类型有关，如 8×22 dB 为 12 800 ps/nm，5×30 dB 为 12 000 ps/nm，3×33 dB 为 7 200 ps/nm，与复用波长数目无关。

表 5-12 接收端 OTU 接口主要参数指标

项 目		单 位	指 标
OTU 的输入 端 S 点参数 要求	接收机灵敏度*	dBm	-25
	接收机反射	dB	<-27
	过载功率	dBm	-9
	输入信号波长区	nm	1 280~1 565
OTU 的输出 端 S _n 点参数 要求	局内最大平均发送功率	dBm	-9
	局内最小平均发送功率	dBm	-18
	远距离最大平均发送功率	dBm	+3
	远距离最小平均发送功率	dBm	-2
	最小消光比	dB	8.2

注：* 在某些情况下可以适当放松。

4) OTU 抖动转移特性

OTU 应具有和 SDH 再生中继器一样的抖动转移特性。OTU 抖动转移函数在图 5-2 曲线的下方，参数值如表 5-13 所示。

表 5-13 抖动转移特性参数指标

STM 等级	f_c /kHz	P /dB
STM-16 (A)	2 000	0.1

5) OTU 输入抖动容限

OTU 输入抖动容限如图 5-3 所示，相应的参数值如表 5-14 所示。

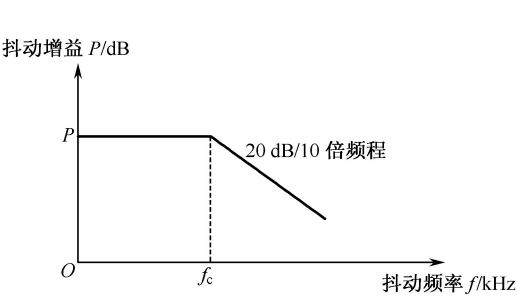


图 5-2 OTU 抖动转移特性

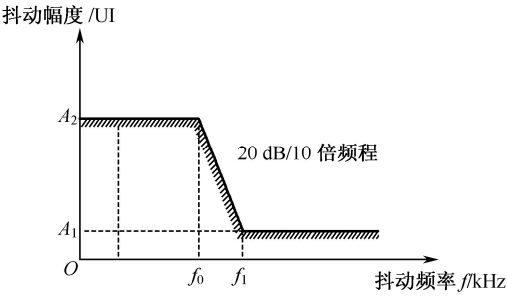


图 5-3 OTU 输入抖动容限

表 5-14 OTU 输入抖动容限数值

STM 等级	f_1/kHz	f_0/kHz	$A_1/\text{UIp-p}$	$A_2/\text{UIp-p}$
STM-16 (A)	1 000	100	0.15	1.5

4. 光接口指标

1) 单个发送机、接收机主要参数的要求

在 WDM 系统中， $S_1 \sim S_n$ 和 $R_1 \sim R_n$ 接口主要参数指标如表 5-15 所示。

表 5-15 应用在 32，16（8）通路 WDM 系统中的 $S_1 \sim S_n$ 和 $R_1 \sim R_n$ 接口指标

项 目		单 位	16（8）路系统	32 路系统
单个发 送机输 出 S_1 至 S_n	线路码型		NRZ	NRZ
	最大-20 dB 谱宽	nm	0.2	0.2
	最小边模抑制比	dB	35	35
	标称中心频率	THz	192.1~193.5	待研究
	通路间隔	GHz	100（200）	100
	最大中心频率偏移	GHz	± 20	± 20
	最大平均发送功率	dBm	0	0
	最小平均发送功率	dBm	-10	-10
	最小消光比	dB	+10	+10
光通道代价 $S_n \sim R_n$		dB	2	2
单个接 收机输 入 R_1 至 R_n	接收机最差灵敏度 （BER=1.0E-12）	dBm	-28	-25
	接收机最大过载	dBm	-9	-9
	接收机反射	dB	-27	-27
	光信噪比	dB	22（20）	22（20）
	最大接收波长	nm	>1 565	>1 565
	最小接收波长	nm	<1 310	<1 310

注：（1）通路间隔与 16 路和 8 路的选择有关，16 路取 100 GHz，8 路取 200 GHz；
（2）光信噪比的取值与选用系统类型有关，16 路和 8 路的 8×22 dB 系统为 22 dB，16 路的 5×30 dB 系统为 20 dB，8 路的 5×30 dB 系统为 21 dB，16 路和 8 路的 3×33 dB 系统取 20 dB；
（3）光缆在 S_1 至 S_n 参考点的回波损耗（含有任何活接头）为 24 dB。

2) 主光通道主要参数

主光通道主要参数指标如表 5-16 至表 5-18 所示。

表 5-16 8 通路主光通道主要参数指标

项 目		单 位	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
MPI-S 和 S' 点	每通路输出最大功率	dBm	+9.0	+11.0	+11.0
	每通路输出最小功率	dBm	+1.0	+5.0	+6.0
	最大总发送功率	dBm	+14.0	+17.0	+17.0
	MPI-S 点每通路信噪比	dB	待研究		
	MPI-S 点最大通路功率差	dB	8	6	5
光通道 MPI-S 至 MPI-R	光通道代价	dB	待研究		
	最大衰减范围	dB	24	30	33
	最小衰减范围	dB	22	28	31
	色散	ps/nm	12 800	12 000	7 200
	反射	dB	-27	-27	-27
	最小回损	dB	24	24	24
MPI-R 和 R' 点	平均每通路最大输入功率	dBm	-13.0	-17.0	-20.0
	平均每通路最小输入功率	dBm	-23.0	-25.0	-27.0
	最大平均总输入功率	dBm	-8.0	-11.0	-14.0
	MPI-R 点每通路最小信噪比	dB	22	21	20
	MPI-R 点最大通路功率差	dB	10	8	7

表 5-17 16 通路主光通道主要参数指标

项 目		单 位	8×22 dB	5×30 dB	3×33 dB
MPI-S 和 S' 点	每通路输出最大功率	dBm	+9.0	+9.0	+9.0
	每通路输出最小功率	dBm	+1.0	+2.0	+3.0
	最大总发送功率	dBm	+17.0	+17.0	+17.0
	MPI-S 点每通路信噪比	dB	*	*	*
	MPI-S 点最大通路功率差	dB	8	7	6
光通道 MPI-S 至 MPI-R	光通道代价	dB	*	*	*
	最大衰减范围	dB	24	30	33
	最小衰减范围	dB	22	28	31
	色散	ps/nm	12 800	12 000	7 200
	反射	dB	-27	-27	-27
	最小回损	dB	24	24	24
MPI-R 和 R' 点	平均每通路最大输入功率	dBm	-13.0	-19.0	-22.0
	平均每通路最小输入功率	dBm	-23.0	-28.0	-30.0
	最大平均总输入功率	dBm	-5.0	-11.0	-14.0
	MPI-R 点每通路最小信噪比	dB	22	20	20
	MPI-R 点最大通路功率差	dB	10	9	8

注：*为待研究。

表 5-18 32 通路主光通道主要参数指标

项 目		单 位	8×22dB	5×30dB	3×33dB
MPI-S 和 S' 点	每通路输出最大功率	dBm	5.0 (8.0)	7.0	6.0
	每通路输出最小功率	dBm	0 (3.0)	3.0	4.0
	最大总发送功率	dBm	17 (20)	20	20
	MPI-S 点每通路信噪比	dB	>30	>30	>30
	MPI-S 点最大通路功率差	dB	5	4	2
光通道 MPI-S 至 MPI-R	光通道代价	dB	2	2	2
	最大衰减范围	dB	24	30	33
	最小衰减范围	dB	22	28	31
	色散	ps/nm	12 800	12 000	7 200
	反射	dB	-27	-27	-27
MPI-R 和 R' 点	最小回损	dB	24	24	24
	平均每通路最大输入功率	dBm	-17 (-14)	-21	-25
	平均每通路最小输入功率	dBm	-24 (-21)	-27	-29
	最大平均总输入功率	dBm	-5 (-2)	-10	-13
	MPI-R 点每通路最小信噪比	dB	22	20	20
	光信号串音	dB	-22	-22	-22
	MPI-R 点最大通路功率差	dB	7	6	4

注：括号中的值为特殊情况下，8×22 dB WDM 系统光放大器的最大输出为+20 dBm 时的参数，其余的参数为 8×22 dB WDM 系统光放大器的最大输出为+17 dBm 时的参数。

5. 光监控信道（OSC）性能要求

为了使监控信道信息能够很好的工作，需要对监控信道的波长、信息速率、线路码型和定时方式进行严格定义。

1) 监控通路的工作波长

对于使用线路放大器的 WDM 系统，OSC 应能在光再生器处以足够低的误码率进行分插。由于 EDFA 的增益区为 1 540 nm、1 560 nm，所以 OSC 的工作波长必须位于 EDFA 有用增益带宽的外面（带外 OSC）。

我国规定 OSC 的工作波长为 1 510 nm。

2) OSC 的传输速率

在实际的 WDM 系统中，真正需要监控的信息大部分局限在 EDFA 的工作状态方面，所以监控信息量并不是很大。另外为了满足在光放大器出现故障的情况下 OSC 仍能正常工作的要求，其接收灵敏度应该比较高，从而使 OSC 信号能不经光放大器的放大也能覆盖业务主信号的最大传输距离。

综合以上考虑，OSC 的工作速率可选为 2 Mb/s。

3) OSC 的定时

对 OSC 的定时提出如下要求：

(1) OSC 在发送端与每个 WDM 站应有外定时接口，或从 SDH 系统获取定时信号；

(2) 在每个光再生器上，用定时提取方式获得定时信号，外定时信号消失时，OSC 应通过内部定时源的自由振荡来获得时钟。

(3) OSC 内部定时源的自由振荡精度应不大于±20 ppm。

4) OSC 的接口参数

光监控信道光接口参数及中继段误码指标（BER 应优于 10^{-11} ）如表 5-19 所示。

表 5-19 光监控信道（OSC）光接口参数及中继段误码指标

参 数	指 标
监控波长	1 510 nm
监控速率	2 Mb/s
信号码型	CMI
信号发送功率	0~-7 dBm
光源类型	MLM LD
最小接收灵敏度	-48 dBm
误码性能	1×10^{-11}

5) OSC 信息的接入与分出

OSC 监控信息的接入与分出如图 5-4 所示。

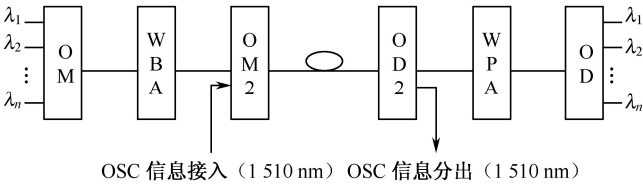


图 5-4 OSC 监控信息的接入与分出（单向）

由图 5-4 可见，为了保证 OSC 所传送的监控信息可以在每个光再生站和 WDM 系统局站上分出或接入，而且不受光放大器的影响，在发送端应该在 WDM 系统的功率放大器 WBA 之后，用一个二波分合波器 OM2 把 OSC 信息接入到主信道之中；在接收端应该在 WDM 系统的前置放大器（WPA）之前，用一个二波分分波器 OD2 把 OSC 信息分解出来。

6) OSC 的帧结构

OSC 的 2 Mb/s 物理接口应符合 G.703 要求。其比特率与帧结构应符合 G.704 规定。

在 OSC 的帧结构中，至少应包括 2 个时隙公务通道，一个作为光再生段公务联络（E1），可在光放大器再生站上接入，另一个作为光复用段公务联络（E2），可在系统的终端站接入；1 个时隙使用者通道，供使用者（通常为网络提供者）使用，可在光放大器再生站上接入；3 个时隙光再生段 DCC 通道，8 个时隙光复用段 DCC 通道，以传送 WDM 系统的网管信息。

5.2 系统性能与测试

对于 WDM 系统的测试，除了 SDH 原有的测试内容外，还有一些新的测试要求。本

节只阐述系统测试方法，包括传输性能的测试、主光通道的测试等，对单盘测试不进行介绍。系统的传输特性主要测试系统的误码特性和抖动特性——系统的输入、输出抖动和抖动转移函数。主光通道的测试包括 MPI-R 点、MPI-S 点以及各个中继站上的 MPI-R' 点和 MPI-S' 点等各个点的光功率，光信号噪声比，系统工作波长、波长间隔和系统光通道代价等。通过测试来验证性能指标是否符合要求。

5.2.1 误码性能与测试

误码定义为系统设备实际运行时接收到的数据流的错误位。通常以 bit 来表示。对于高比特率通道的误码性能是以“块”为基础的一组参数，通常以误块秒比（ESR）、严重误块秒比（SESR）、背景误块比（BBER）等来表示。

因目前的 WDM 系统主要承载 SDH 信号，所以其误码性能以承载的 SDH 信号为依据进行规范。我国传输网（含长途和中继）误码性能指标按距离均分直到再生段，相当每千米可以分得 G.826 规定的端到端指标 0.005 5%，因而 420 km 、280 km 和 50 km 假设参考数字段 HRDS 的误码性能应满足相应的要求，分别如表 5-20 至表 5-22 所示。

表 5-20 420 km HRDS 误码性能指标

<div>速率/（Kb/s）</div> <div>参数</div>	2 048	34 368	139 264/155 520	622 080	2 488 320
ESR	9.24×10^{-4}	1.733×10^{-3}	3.696×10^{-3}	待定	待定
SESR	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}
BBER	4.62×10^{-6}	4.62×10^{-6}	4.62×10^{-6}	2.31×10^{-6}	2.31×10^{-6}

表 5-21 280 km HRDS 误码性能指标

<div>速率/（Kb/s）</div> <div>参数</div>	2 048	34 368	139 264/155 520	622 080	2 488 320
ESR	6.16×10^{-4}	1.155×10^{-3}	2.464×10^{-3}	待定	待定
SESR	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}
BBER	3.08×10^{-6}	3.08×10^{-6}	3.08×10^{-6}	1.54×10^{-6}	1.54×10^{-6}

表 5-22 50 km HRDS 误码性能指标

<div>速率/（Kb/s）</div> <div>参数</div>	2 048	34 368	139 264/155 520	622 080	2 488 320
ESR	1.1×10^{-4}	2.063×10^{-4}	4.4×10^{-4}	待定	待定
SESR	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}
BBER	5.5×10^{-7}	5.5×10^{-7}	5.5×10^{-7}	2.75×10^{-7}	2.75×10^{-7}

需要说明的是，G.826 建议提出评估实际网络性能是否满足误码性能需要观测一个月，因此网络误码性能指标属于长期指标。并且上述误码性能指标是构成系统的设备寿命终了之前，系统任何时候都应满足的指标，意味着这是一个最低的要求，实际系统设计时需要在此基础上提高要求，以留有适当的富余度。

系统误码性能测试如图 5-5 所示。

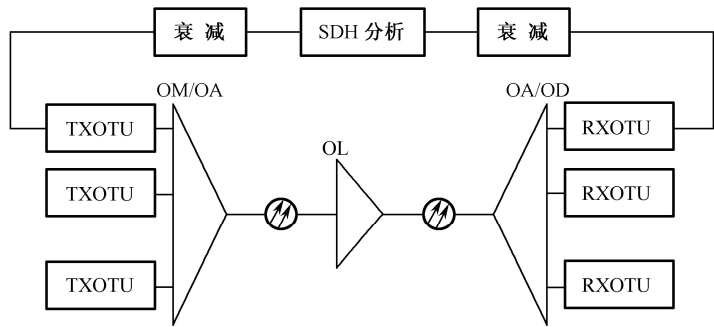


图 5-5 系统误码性能测试

1. 操作步骤

- (1) 按图 5-5 连接好测试仪表；
- (2) 调节光信号的衰减，使输入到 SDH 分析仪和 TXOTU 的信号功率适当；
- (3) 根据波长转换板接入速率的不同，设置 SDH 分析仪的发送和接收信号，设置测试时间为 24 h，进行 24 h 误码测试，测试结束后记录测试结果。

2. 注意事项

应注意 SDH 测试仪和 TXOTU 接收功率的范围，避免输入光功率过大，损坏单板和 SDH 测试仪。

考虑系统的 DWDM 设备有多个通道，若每个通道都测试一遍所需时间较长或测试仪表较多，因此在出厂验收时，可级联进行误码测试。SDH 测试仪表发出的信号送入第一路 TXOTU，相对应的输出信号经 RXOTU 后送给第二路 TXOTU 转换，依次类推，SDH 测试仪接收最后一路输出给 RXOTU 转换后的光信号，这样，一次可完成所有通道的误码测试。

5.2.2 抖动性能与测试

系统接口分为网络接口和数字段接口，数字段接口是指单站设备的接口，网络接口是指不同的 SDH 网元互联的接口。WDM 系统网络接口指标是指系统网络接口指标的性能，包括网络接口的输出抖动、输入抖动容限和抖动转移特性等。WDM 系统所承载的 SDH 的抖动性能要求，仍应该满足相应的 SDH 抖动要求。

1. 输出抖动

输出抖动定义为网络输入接口无抖动时，网络输出接口输出的抖动量，测量时间为 60 s，测量结果为最大的峰-峰值。输出抖动要保证 SDH 网元下传送 PDH 支路、STM-N 线路业务时，输出的抖动能被接收此信号的设备所承受。为了保证不同 SDH 网元之间的互联且不影响网络的传输质量，网络输出接口允许的最大抖动不应超过表 5-23 中的规定，表中括号内数值为数字段接口要求。

表 5-23 网络接口的输出抖动

信号速率	网络接口容限值		测量滤波器参数		
	B1	B2	f1	f3	f4
STM-1	1.5UI (0.75UI)	0.15UI	500 Hz	65 kHz	1.3 MHz
STM-4	1.5UI (0.75UI)	0.15UI	1 000 Hz	250 kHz	5 MHz
STM-16	1.5UI (0.75UI)	0.15UI	5 000 Hz	1 000 kHz	20 MHz
STM-64	1.5UI (0.75UI)	0.15UI	20 000 Hz	4 000 kHz	80 MHz

2. 测试配置

测试配置如图 5-6 所示。

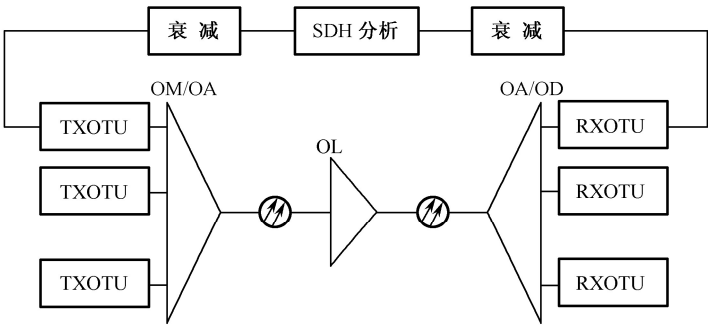


图 5-6 系统网络接口输出抖动测试配置

3. 操作步骤

- (1) 按图 5-6 连接好测试仪表。
- (2) 调节光信号的衰减，使输入到 SDH 分析仪和 TXOTU 的信号功率适当。
- (3) 根据波长转换板接入速率的不同，设置 SDH 分析仪的发送和接收信号，并选择测试项为输出抖动测试项。在 SDH 分析仪上设置适当的测量滤波器，连续进行不少于 60 s 的测量，记录输出抖动最大 P-P（峰-峰）值。
- (4) 测试其他速率时需要在 SDH 信号发生器设置对应的输出信号。

4. 注意事项

应根据波长转换板的接收模块的类型来调整光衰减器。一般情况下，STM-16 信号可以使用 PIN 和 APD 两种模块，PIN 管的接收光功率范围为-12~0 dBm，APD 的接收光功率为-28~-9 dBm，STM-64 信号目前大多采用 PIN 模块。同时应注意 SDH 分析仪接收光功率范围，避免损坏仪表和单板。

5.2.3 输入抖动容限及测试

PDH 支路接口的输入抖动容限定义为在设备不产生误码的情况下，所能承受的最大输入抖动值，SDH 网元的支路输入接口能包容 PDH 支路信号的最大抖动。STM-N 线路接口的输入抖动容限定义为能使光设备产生 1 dB 光功率代价的正弦抖动峰-峰值，本级网元的输入抖动容限能容忍上级网元产生的输出抖动。WDM 系统承载的 SDH 网络输入

口应至少能容忍图 5-7 中模框所施加的输入抖动和漂移，相应的参数值如表 5-24 所示。

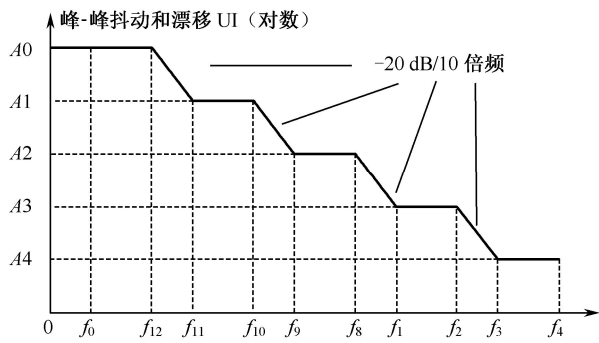


图 5-7 SDH 设备输入抖动和漂移容限

表 5-24 SDH 设备输入抖动和漂移容限

SDH 等级	UI _{P-P}					频 率									
	A0 18 μs	A1 2 μs	A2 0.25 μs	A3	A4	f ₀ (×10 ⁻⁵ Hz)	f ₁₂ (×10 ⁻⁴ Hz)	f ₁₁ (×10 ⁻³ Hz)	f ₁₀ Hz	f ₉ Hz	f ₈ Hz	f ₁ Hz	f ₂ kHz	f ₃ kHz	f ₄ MHz
STM-1	2 800	311	39	1.5	0.15	1.2	1.78	1.6	1.56	0.125	19.3	500	6.5	65	1.3
STM-4	11 200	1 244	156	1.5	0.15	1.2	1.78	1.6	1.56	0.125	9.65	1 000	25	250	5
STM-16	44 790	4 977	622	1.5	0.15	1.2	1.78	1.6	1.56	0.125	12.1	5 000	100	1 000	20

测试配置如图 5-6 所示。

1. 操作步骤

- (1) 按图 5-6 连接好测试仪表。
- (2) 调节光信号的衰减，使输入到 SDH 分析仪和 TXOTU 的信号功率适当。
- (3) 根据波长转换板接入速率的不同，设置 SDH 分析仪的发送和接收信号，并选择 SDH 测试仪为抖动容限测试方式，设置相应的测试频率点和最大抖动值。
- (4) 启动测试，测试结束后记录网络接口的抖动容限值。整个测试过程即在某个频率点上，增加输入抖动幅度，直至出现误码，记录下该频率点的频率和幅度。再改变抖动频率，重复以上操作，获得完整的抖动输入容限。

2. 注意事项

应根据波长转换板的接收模块的类型来调整光衰减器，同时注意 SDH 信号分析仪接收光功率范围通常小于-10 dBm，避免损坏仪表和单板接收模块。

5.2.4 抖动转移特性

抖动转移特性定义为再生器中 STM-N 输出信号的抖动与输入 STM-N 信号的抖动之比随频率变化的关系。有关抖动转移特性的规范只适用于 SDH 再生器，抖动转移特性是表明再生器对抖动的抑制能力。网络接口的抖动转移特性是测试系统网络接口对抖动的抑制能力。ITU-T 目前只对 SDH 再生器的抖动转移特性进行了规范，尚未对数字段的抖

动转移特性进行规范。SDH 再生器的抖动转移特性应满足图 5-8 和表 5-25 的要求。

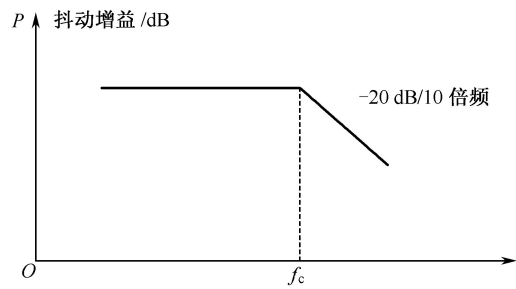


图 5-8 SDH 再生器抖动转移特性

表 5-25 SDH 再生器抖动转移特性参数值

STM 等级	f_c /kHz	p /dB
STM-1 (A)	130	0.1
STM-1 (B)	30	0.1
STM-4 (A)	500	0.1
STM-4 (B)	30	0.1
STM-16 (A)	2 000	0.1
STM-16 (B)	30	0.1

其中括号内 A 表示 A 型中继器，其定时滤波器为声表面滤波器或陶磁谐振器等无源器件；B 表示 B 型中继器，其定时滤波器为锁相环等有源器件。

测试配置如图 5-6 所示。

1. 操作步骤

(1) 按图 5-6 连接好测试仪表。

(2) 调节光信号的衰减，使输入到 SDH 分析仪和 TXOTU 的信号功率适当。根据波长转换板接入速率的不同，设置 SDH 分析仪的发送和接收信号。

(3) 设置 SDH 测试仪为抖动转移特性测试方式，设置相应的测试频率点和最大抖动。

(4) 断开 SDH 测试仪与被测波长转换板的连接，用光纤环回 SDH 测试仪的收发，进行 SDH 自校准。

(5) 校验完成后，连接被测波长转换板的网络接口，启动抖动转移特性进行自动测试，记录测试结果。

2. 注意事项

应根据波长转换板的接收模块的类型来调整光衰减器，同时注意 SDH 信号分析仪接收光功率范围通常小于-10 dBm，避免损坏仪表和单板接收模块。

5.2.5 主光通道的测试

DWDM 系统的主光通道是指波分复用系统的复用器和功率放大器的输出端参考点 MPI-S 与接收端光前置放大器和解复用器之前的参考点 MPI-R 点之间的通道。主光通道的测试包括：发送光功率、每通路输出光功率、最大通路功率差、接收点的每通路输入光功率、最大通路功率差、信噪比、光通道代价等。如图 5-9 所示为一个典型的 DWDM 系统的主要光接口示意图。

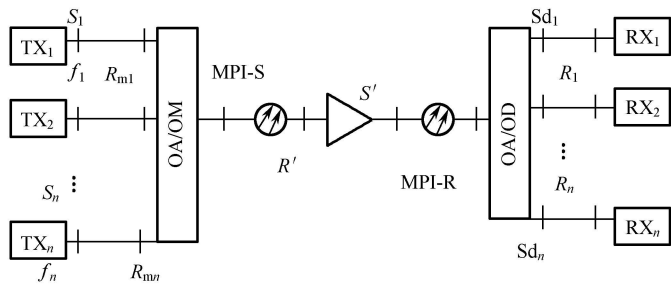


图 5-9 一个典型的 DWDM 系统的主要光接口示意图

图中各参考点的基本描述如表 5-26 所示。

表 5-26 各参考点的基本描述

参 考 点	定 义
S_1, S_2, \dots, S_n	通道 1~ n 在发射机光输出连接器处光纤上的参考点
$R_{m1}, R_{m2}, \dots, R_{mn}$	通道 1~ n 在 OA/OM 的光输入连接器处光纤上的参考点
MPI-S	OM/OA 的光输出连接器后面光纤上的参考点
S'	线路光放大器的光输出连接器后面光纤上的参考点
R'	线路光放大器的光输入连接器前面光纤上的参考点
MPI-R	在 OA/OD 的光输入连接器前面光纤上的参考点
S_{d1}, \dots, S_{dn}	通道 1~ n 在 OA/OD 的光输出连接器处光纤上的参考点
R_1, \dots, R_n	通道 1~ n 接收机输入连接器处光纤上的参考点

1. MPI-S 点每通路输出光功率

MPI-S 和 S' 点每信道输出光功率定义为经过合波器复用，并经过放大器放大输出后的每信道平均发送光功率。测试连接图如图 5-10 所示。

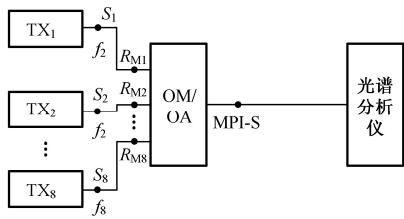


图 5-10 MPI-S 点每通路输出光功率测试连接图

1) 操作步骤

- (1) 按图 5-10 连接好测试仪表；
- (2) 调整光谱分析仪的显示波长范围，将需要测试的通路波长显示在屏幕的中间；
- (3) 将光标定位在波长脉冲的峰值处，根据仪表的数字显示，记录该波长的光功率值；
- (4) 重复步骤 (2) 和步骤 (3)，测试并记录其他通路的输出光功率。

2) 注意事项

测试每通路的输出光功率也可以采用多波长分析仪，对于能同时自动测量和显示出每个波长通路光功率值的光谱分析仪，无须测试多次。

2. MPI-S 点总发送光功率

MPI-S 点和 S' 点总发送光功率定义为经过合波器复用，并经过放大器放大输出后的总的发送光功率，即在参考点 MPI-S 的平均发送光功率。具体数值大小与接入的信道数有关。测试连接图如图 5-11 所示。

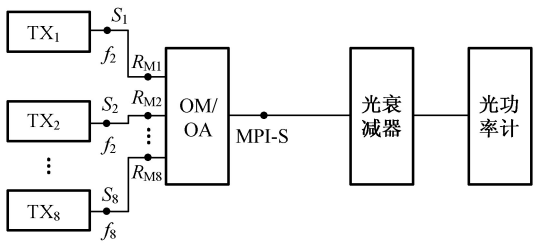


图 5-11 总发送光功率测试连接图

1) 操作步骤

- (1) 按图 5-11 连接好测试仪表；
- (2) 调节光衰减器，使光功率计的输入功率处于它的动态范围内；
- (3) 将光功率计设置在 1 550 nm 窗口，待光功率计的读数稳定之后，读出并记录该功率值；
- (4) 功率值与光衰减器的衰减值相加，即为总输出功率值。

2) 注意事项

精确测量时，应考虑到连接器的损耗，对上面得到的功率值进行修正。

3. MPI-S 点每通路信噪比

MPI-S 点每通路信噪比定义为在同一时间内、在给定的光分辨率带宽内，每通路光信号功率与噪声功率的比值。测试连接图如图 5-10 所示。

操作步骤如下：

- (1) 按图 5-10 连接好测试仪表；
- (2) 启动光谱分析仪，设置光谱仪中滤波器的噪声等效带宽为 0.1 nm，调整光谱分析仪的显示波长范围，将需要测试的通路波长和 ASE 噪声的功率显示在屏幕的中间；
- (3) 将光谱分析仪设置为信噪比方式，并设置信噪比计算的参考点，可直接读出每

通路的信噪比，记录测试结果值。

4. MPI-S 点的最大通路功率差

MPI-S 点的最大通路功率差指的是在同一时间内，在给定的光分辨率下，MPI-S 点的所有通路中的最大光功率与最小光功率的差值。测试配置如图 5-10 所示。

1) 测试步骤

- (1) 按图 5-10 连接好测试仪表；
- (2) 调整光谱仪的波长范围，使所有的波长通路都显示在屏幕上；
- (3) 将一个纵向光标定位在所有通路中功率最大的某个通路波长的峰值处，将另一个纵向光标定位在所有通路中功率最小的某个通路波长的峰值处，读出这两个光标之间的差值即为最大通路功率差。

2) 注意事项

对于可自动测量和显示最大通路功率差的光谱仪，可直接读出通路最大功率差。

5. MPI-R 点每通路输入光功率

MPI-R 点和 R' 点每通路输入光功率定义为在 MPI-R 点和 R' 点处每信道输入到光放大器的平均光功率。测试连接图如图 5-12 所示。

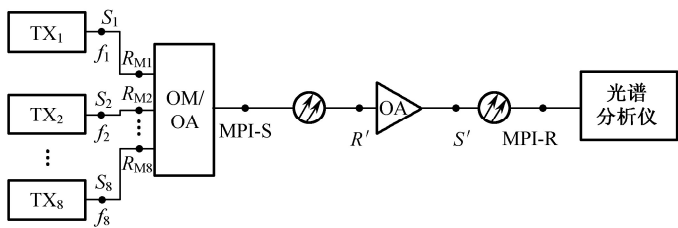


图 5-12 MPI-R 点每通路输入光功率测试连接图

1) 操作步骤

- (1) 按图 5-12 连接好测试仪表，设置光谱分析仪的噪声等效带宽为 0.1 nm；
- (2) 调整光谱分析仪的显示波长范围，将需要测试的通路波长显示在屏幕的中间；
- (3) 将光标定位在波长脉冲的峰值处，根据仪表的数字显示，记录下该波长的光功率值；
- (4) 重复步骤 (2) 和步骤 (3)，测试并记录其他多个通路的输出光功率。

2) 注意事项

测试每通路的输出光功率也可以采用多波长分析仪，对于能同时自动测量和显示出每个波长通路光功率值的光谱分析仪，无须测试多次。

6. MPI-R 点总输入光功率

MPI-R 点和 R' 点总输入光功率定义为在参考点 MPI-R 点和 R' 点处平均接收到的总的光功率。具体数值大小与接入的信道数有关。测试连接图如图 5-13 所示。

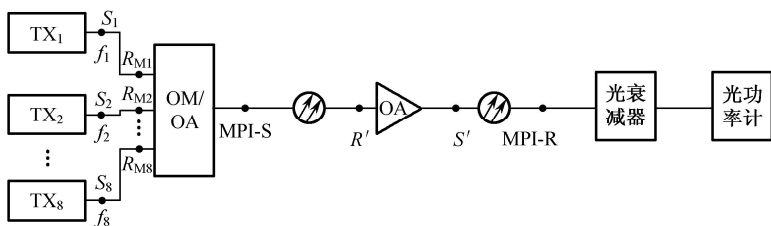


图 5-13 总发送光功率测试连接图

1) 操作步骤

- (1) 按图 5-13 连接好测试仪表；
- (2) 调节光衰减器，使光功率计的输入功率在它的动态范围内；
- (3) 将光功率计设置在 1550 nm 窗口，待光功率计的读数稳定之后，读出并记录该功率值；
- (4) 功率值与光衰减器的衰减值相加，即为总输出功率值。

2) 注意事项

精确测量时，应考虑到连接器的损耗，对上面得到的功率值进行修正。

7. MPI-R 点每通路信噪比

MPI-R 点每通路信噪比定义为在同一时间内、在给定的光分辨率带宽内，每通路光信号功率与噪声功率的比值。测试配置如图 5-12 所示。

操作步骤如下：

- (1) 如图 5-12 连接好测试仪表；
- (2) 启动光谱分析仪，设置光谱仪中滤波器的噪声等效带宽为 0.1 nm，调整光谱分析仪的显示波长范围，将需要测试的通路波长和 ASE 噪声的功率显示在屏幕的中间；
- (3) 将光谱分析仪设置为信噪比方式，并设置信噪比计算的参考点，可直接读出每通路的信噪比，记录测试结果值。

8. MPI-R 点最大通路功率差

MPI-R 点最大通路功率差定义为在同一时间内、在给定的光分辨率带宽内，每通路最大发送功率与最小发送功率的差值。测试连接线如图 5-12 所示。

1) 测试步骤

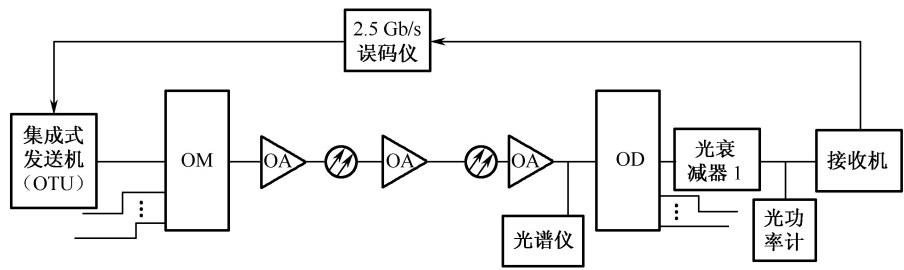
- (1) 按图 5-12 连接好测试仪表；
- (2) 调整光谱仪的波长范围，使所有的波长通路都显示在屏幕上；
- (3) 将一个纵向光标定位在所有通路中功率最大的某个通路波长的峰值处，将另一个纵向光标定位在所有通路中功率最小的某个通路波长的峰值处，读出这两个光标之间的差值即为最大通路功率差。

2) 注意事项

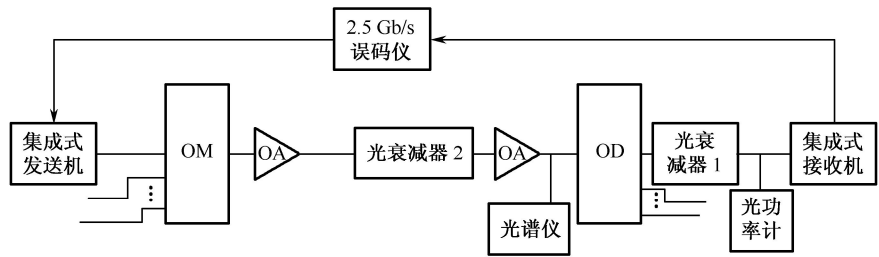
对于可自动测量和显示最大通路功率差的光谱仪，可直接读出通路最大功率差。

5.2.6 光通道代价

光通道代价指的是脉冲在光通道的传输过程中由于波形失真导致的接收机灵敏度的下降（接收机灵敏度在误码率为 1×10^{-12} 时测量）。测试配置如图 5-14 所示。



(a) 连接主光通道后灵敏度测试配置



(b) 背靠背灵敏度测试配置

图 5-14 主光通道的光通道代价测试配置

1) 测试步骤

- (1) 按图 5-14 (a) 连接好测试仪表；
- (2) 用光谱仪测出此时 MPI-R 点的光信噪比，并记录下来；
- (3) 调节光衰减器 1，使误码仪的误码率读数在 10^{-10} 的量级上，待误码仪上的读数稳定之后，读出并记录误码率；
- (4) 断开光衰减器 1 之后的连接器，与光功率计相连，读出并记录此时接收端的光功率；
- (5) 重复步骤 (3) 和步骤 (4) 若干次，测得对应误码率 10^{-6} ， 10^{-7} ， 10^{-8} 和 10^{-9} 的接收光功率值；
- (6) 按照图 5-14 (b) 连接好背靠背式的测试仪表；
- (7) 用光谱仪测试接收端的光信噪比，调节光衰减器 2，使光谱仪测出的光信噪比值等于步骤 (2) 测得的光信噪比值；
- (8) 重复步骤 (3) ~ 步骤 (5)，测出背靠背配置情况下误码率与接收光功率的对应数值；
- (9) 采用外推法，在双对数坐标纸上分别画出两种配置情况下的误码率与接收光功率的对应曲线，延长曲线至 1×10^{-12} 误码率处，分别记录两条曲线对应误码率为 1×10^{-12} 时的接收光功率值；
- (10) 利用公式：光通道代价=加光通道配置的接收灵敏度-背靠背的接收灵敏度，

即可得到光通道代价的数值。

2) 注意事项

(1) 在测量的过程中，除被测通路以外的其他通路应当正常工作。

(2) 由于直接测试误码率为 1×10^{-12} 的接收灵敏度的时间过长且不易操作，因此采用外推法是测试接收机灵敏度的一种替代方法，适用于需要快速、大量测试接收机灵敏度的场合。

第 6 章 WDM 系统的安全性与保护

6.1 WDM 的安全性

对于含光放大器的 WDM 系统，安全要求特别重要。ITU-T 建议规定：单路或合路入纤最大光功率电平为 17 dBm。该最大光功率电平主要取决于两个因素，激光器安全和光纤的非线性。对链路切断时可能引起的强烈“浪涌”效应更需要重视，必须保证系统能够及时关闭泵浦源和系统，以防止对系统造成损害。

6.1.1 光纤和光接头的熔坏现象

波分复用系统的光功率较大，对光纤本身及光器件提出了很高的要求。所谓光纤和光接头的熔坏现象，是指当光功率过大，致使光纤和光接头发生灾变的现象，灾变可能是暂时性失效也可能是永久性损伤。这种现象主要发生在光纤弯曲部位和光纤接头的位置。光器件（如光耦合器、光衰器等）也会由于高功率而发生灾变。导致光纤和接头熔坏的原因是：光在光纤弯曲部位和接头位置部分被吸收，转化为热能，由于吸收激光的能量，导致光纤及涂覆层内出现一个随时间变化、随空间位置分布的温度，从而使光纤的性质发生变化，或发生暂时性失效或产生永久性损伤。温度的高低主要取决于光纤及涂覆层的材料、密度、厚度、光功率的大小及光传输的时间等。由于热辐射而产生温升应力和光纤变形，影响光的传输。如果光功率过大，那么光纤及接头部位温度急剧上升，导致光纤结构发生变化，最后出现宏观的灾难性损伤，严重时会使光纤或接头被熔断。

6.1.2 光“浪涌”现象

所谓“浪涌”现象，是指当 WDM 系统的传输链路突然断开（如光缆被切断）或其他原因导致信号丢失时，如果光放大器的泵浦源不关闭，继续向掺铒光纤“泵浦”，可能使处于稳态的铒离子越积累越多；如果此时有一个较高功率的光信号输入，将几乎使所有处于稳态的铒离子发生受激辐射，从而导致光放大器的输出光功率出现“尖峰”（如 +30 dBm 即 1 W 以上）。特别是在级联 EDFA 的情况下，其输出峰值光功率可能会高达数十瓦。这种高功率光信号对系统是非常危险的，它有可能会“烧坏”光连接器和光接收机，给系统带来无法弥补的损伤，而且对维护人员也会造成伤害。

出于安全的考虑，为避免光放大器的“浪涌”现象。在主光通道上的一段或多段光中继段上光功率信号丢失时，必须提供功率自动减少功能 APR 或自动功率切断功能 ALS 和重启功能。

WDM 系统的安全主要是防止传输链路突然关断时出现的“光浪涌”现象，因为它可能严重地损坏系统，造成不可弥补的损失。为此系统必须具备自动功率减少功能 APR 或自动线路关断功能 ALS。

6.1.3 功率自动减少功能（APR）

APR（Auto-Power Reducing）功能示意图如图 6-1 所示。

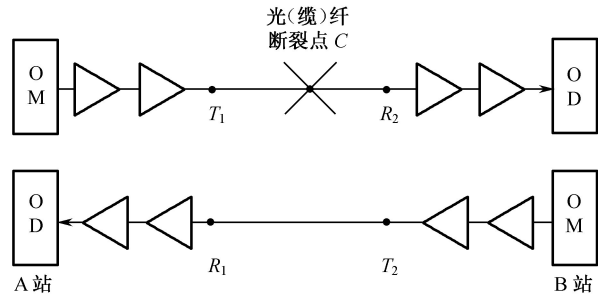


图 6-1 APR 功能示意图

在图 6-1 中，假设 C 点光缆断裂，则 R_2 点会出现光传输段的连续性丢失（LOC-OTS）缺陷，于是启动 APR 进程。

启动 APR 进程后，B 站的光发送设备便降低其光功率输出，从而使 T_2 点的输出光功率减少；导致 R_1 出现 LOC-OTS 缺陷，于是 A 站的光发送设备降低其光功率输出，这又使得 T_1 点处的输出光功率减少。

APR 进程在 3 s 之内，应使所有光输出端的光功率减少到 0 dBm 以下。

当故障修复以后，需要有一种自动的或人工的重启动来恢复传输。在连接中断以后或在前一次（不成功的）重启动动作以后的 100 s 内不应激活重启动。

APR 程序不应导致下游产生告警。

6.1.4 线路自动关断功能（ALS）

1. ALS 的参考配置

ALS（Auto-Line Shutdown）功能的参考配置如图 6-2 所示。

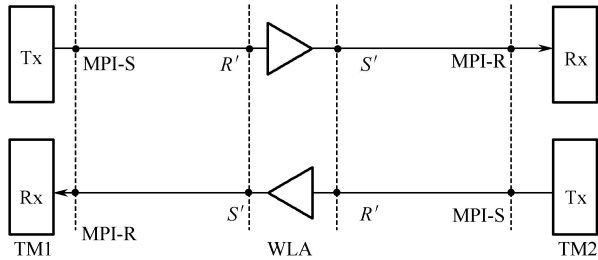


图 6-2 ALS 功能的参考配置

在图 6-2 中，“Tx”为 WDM 系统的复用器/光放大器（OM/OA），“Rx”为光放大器/解复用器（OA/OD）。

当系统检测到传输链路上的信号丢失时（LOS），应能快速切断上游再生段和下游再生段内的所有光放大器（主要是切断 EDFA 的泵浦源），以避免“浪涌”现象的出现；

当信号恢复后，应及时重新启动光放大器工作。

对于 WDM 系统，只有当主通道的光信号丢失时才启动 ALS 进程。实施 ALS 进程时，不应该对光监控通道 OSC 产生任何影响。

2. ALS 的进程与时间要求

1) 自动线路终端关断（去激活）

当在参考点 MPI-R 检测到信号丢失（LOS）后，要经过一段很短的确认时间再将 LOS 信号激活；在连续出现 500 ms 的 LOS 信号后，才真正下达关闭参考点 MPI-S 光发送机的命令。线路的关断进程如图 6-3 所示。

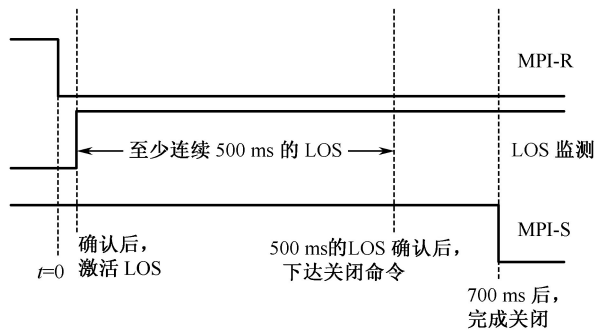


图 6-3 线路的关断进程

从在参考点 MPI-R 检测到信号丢失（LOS）那一刻开始，到关闭参考点 MPI-S 的光输出信号为止，这一段时间也就是表 6-1 中的终端去激活时间，即应小于 700 ms。

2) 系统再启动（激活）

系统应该具备当信号恢复后重新启动的功能。系统再启动是指从接收机在参考点 MPI-R 收到光信号起，到光发送机在参考点 MPI-S 发送光信号为止，对于不含光放大器的系统来讲，G.958 规定该过程的时间为 850 ms。对于包括光放大器的系统，应考虑 WPA 的响应时间（可暂定为 300 ms），还要考虑 WBA 的响应时间（可暂定为 100 ms）。因此总的系统再启动（线路终端激活）时间为：850+300+100=1 250 ms，如表 6-1 所示。

表 6-1 ALS 功能的时间常数

时 间 常 数	参 考 点	数 值	注 释
终端激活响应时间	MPI-R 至 MPI-S	≤ 1 250 ms	(1)
终端去激活时间	MPI-R 至 MPI-S	500~700 ms	(2)
线路放大器激活时间	R' 至 S'	10~300 ms	(3)
线路放大器去激活时间	R' 至 S'	40~100 ms	
功率放大器激活时间	R' 至 MPI-S	10~100 ms	(3)
手动重启和自动重启的脉冲长度	N.A	8.5~9.5 s	
自动重启的脉冲保持重复时间	N.A	60~300 s	

注：（1）该数值在 G.958 基础上考虑了预放和功放的 300 ms 和 100 ms 响应时间；（2）在含光放大器 ASE 噪声的情况下，LOS 的条件与 G.958 中相同。该数值在 G.958 规定 600 ms 的基础上附加了 100 ms 功放的去激活时间；（3）光脉冲 10% 到 90% 的上升时间应大于 10 ms。

对于 WDM 系统，只有当所有主通路的光信号都丢失时才启动 APSD 进程。APSD 实施时，不影响并且能保持所有光监控通路（OSC）功能的实施。

6.2 WDM 系统保护

WDM 系统的保护可以分为点到点应用保护和环网应用保护两种类型。点到点应用保护有两种保护方式，一种是基于波长通路的保护；另一种是光复用段保护。环网应用保护也有两种保护方式，一种是基于单波长、在 SDH 层实施的环网保护；另一种是采用具有分插能力 OADM 的通道保护或线路保护。

6.2.1 点到点应用保护

1. 基于单个波长的 1+1 保护

基于单个波长通路的 1+1 保护的示意图如图 6-4 所示。

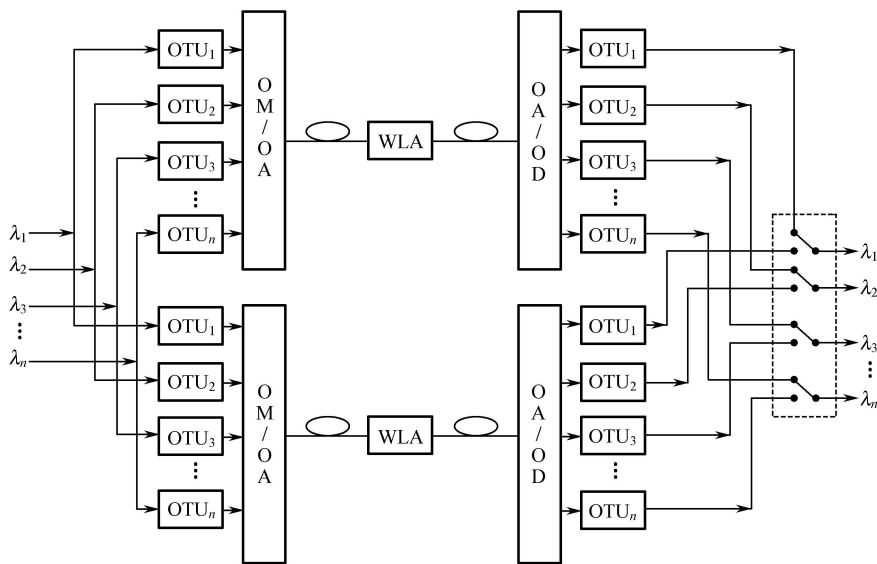


图 6-4 基于单个波长通路的 1+1 保护的示意图

由图 6-4 可见，这种保护机制与 SDH 系统的 1+1 保护相类似，WDM 系统的所有设备都需要备份，业务信号在发送端被永久性地桥接在两个系统上，而在接收端监测从这两个系统收到的信号质量，并择优选出。

2. 1：N 光波长保护

一个 WDM 系统可以承载多个波长，所以可用系统中的某冗余波长为其他工作波长通路提供保护，但需要通过光开关进行保护倒换，如图 6-5 所示。

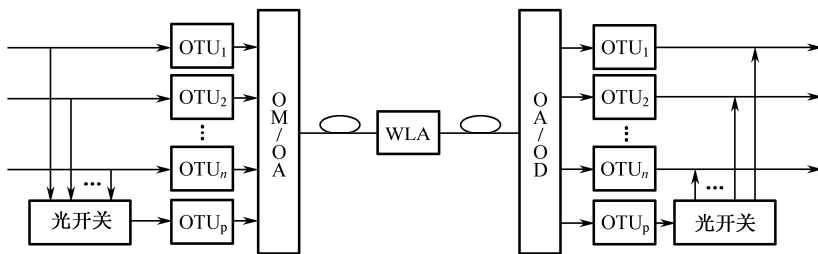


图 6-5 1 : N 波长通路保护

在图 6-5 中，利用 1 : N ($N=1\sim 14$) 光开关，保护波长 OTU_p 可为 $OTU_1\sim OTU_n$ 工作波长通路提供保护。

3. 光复用段保护 OMSP

在 WDM 系统中，把两个 OTM 站之间的部分（包括光缆与光放大站）称为光复用段。

光复用段保护 OMSP (Optical Multiplexing Section Protection) 采用双发选收机制，即在光路上采用 1+1 保护。OMSP 的工作原理图如图 6-6 所示。

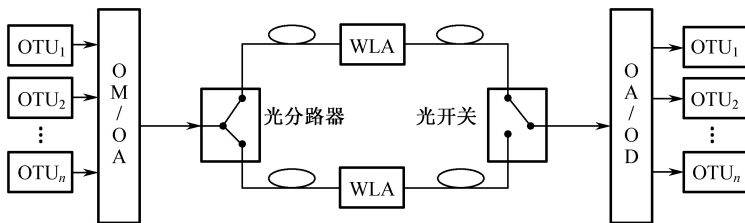


图 6-6 光复用段保护 OMSP

在图 6-6 中，发送端用 1 : 2 光分路器把光信号分成两路（双发），一路提供给光工作复用段，另一路提供给光保护复用段；在接收端用 1×2 光开关对接收光信号择优选择，当光工作复用段发生故障时，接收端用光开关进行倒换，选择由光保护复用段传送的信号。有时也把光复用段保护称为光线路保护 OLP (Optical Line Protection)。

6.2.2 环网应用保护

用 WDM 系统同样可组成环网。环网有两种保护方式，一种是基于单波长、在 SDH 层面实施的保护；另一种是采用具有分插能力 OADM 的通道保护或线路保护。与 SDH 的 ADM 相似，WDM 系统中的光分插复用器 OADM 也可以根据实际需求在中间局站上、下一个或几个复用通道的光波长信号。目前应用的 OADM 大部分是上、下几个固定的波长，即所谓静态 OADM。用 OADM 组成的环网也同样具有与 SDH 环网类似的保护倒换功能。本章将对 OADM 环网的四种保护机制即单向光线路保护、单向光通道保护、双向光线路保护、双向光通道保护进行分析。

1. 单向光线路保护环 ULSR

ULSR (Unidirectional Line Switch Ring) 属于专用式复用段保护，适用于集中型业务分布模式。它的工作原理类似于 SDH 的单向复用段保护环，不同的是，光纤承载的不

是单个光波长而是一个光波长组，所以在进行线路保护倒换时需要把光纤承载的整个波长组进行保护倒换，其工作原理如图 6-7 所示。

环网由两根光纤组成，一根称为工作光纤 S；另一根专门用于保护，称为保护光纤 P。

正常情况下，节点之间的业务信号通过 S 光纤承载的工作波长组单向传送，P 光纤空闲。正常情况下的波长信号传送如图 6-7 (a) 所示。

(1) AC 信号。从节点 A 到节点 C 的波长信号 AC，使用工作光纤 S 承载的第 m 个波长、沿顺时针方向经由节点 B 传送到节点 C。AC 信号的传送路径为：A—B—C。

(2) CA 信号。从节点 C 到节点 A 的波长信号 CA，同样使用工作光纤 S 承载的第 m 个波长、沿顺时针方向经由节点 D 传送到节点 A。CA 信号的其传送路径为：C—D—A。

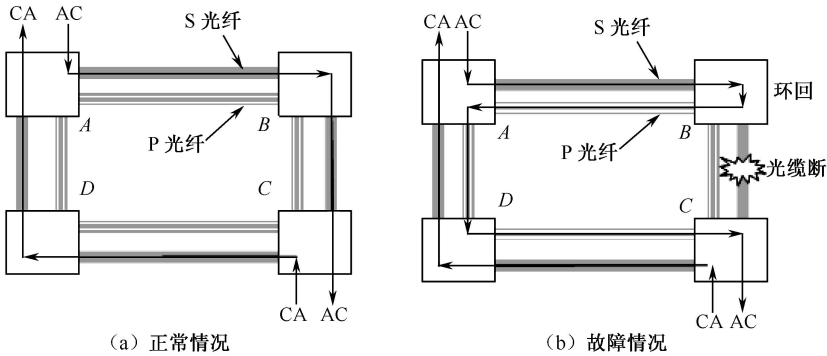


图 6-7 单向光线路保护环 ULSR

当发生故障时，如 B，C 节点之间的光缆被切断，节点 B，C 都能检测到该故障。故障情况下的波长信号传送如图 6-7 (b) 所示。

(1) AC 信号。在节点 B，把向工作光纤 S 发送的波长组桥接到保护光纤 P 中的保护波长组，沿逆时针方向经由节点 B，A，D 传送到节点 C，在节点 C 又倒换回工作光纤 S 中，传送到节点 C。AC 信号的传送路径为：A—B—A—D—C。

(2) CA 信号。CA 波长信号的传送路径不变，仍为：C—D—A。

单向光线路保护环的优点是保护光纤 P 可以传送低等级业务的额外业务，因为在正常情况下保护光纤 P 是空闲的，它的缺点是不能重复使用节点间的波长。

2. 单向光通道保护环 UPSR

UPSR (Unidirectional Path Switch Ring) 属于专用式通道保护，适用于集中型业务分布模式。其工作原理类似于 SDH 的单向通道保护环；不同的是，光纤承载的不是单个光波长而是一个波长组，而且在发端使用的是光分路器，收端使用的是光开关，其工作原理如图 6-8 所示。

1) 正常情况下

(1) AC 信号。AC 信号在节点 A 利用光分路器同时馈入光纤 S 与光纤 P，即所谓 1+1 双发；一路沿 S 光纤、顺时针方向经节点 B 传送到节点 C，传送路径为：A—B—C；另一路沿 P 光纤、逆时针方向经节点 D 传送到节点 C，传送路径为：A—D—C。

这样，在 C 节点会同时收到两路 AC 信号，根据信号质量的优劣、选取其中一路作

为主用。

在正常情况下，选收沿 S 光纤、顺时针方向传送来的 AC 波长信号为主用信号（路径：A—B—C），如图 6-8（a）所示。

（2）CA 信号。CA 波长信号的传送路径与 AC 相似，即在节点 C 双发、在节点 A 选收。正常情况下，A 选收沿 S 光纤、顺时针方向传送来的信号为主用（路径：C—D—A），如图 6-8（a）所示。

2) 故障情况

当发生故障时，如 B，C 节点之间的光缆被切断，则接收端的光接收开关将进行倒换。

（1）AC 信号。在节点 C，由于从节点 A 沿 S 光纤顺时针方向来的 AC 信号（路径：A—B—C）丢失，按照择优选用原则，光接收开关将由 S 光纤倒向 P 光纤、接收从 P 光纤沿逆时针方向传送的信号作为主用（路径：A—D—C），如图 6-8（b）所示。

（2）CA 信号。CA 波长信号仍按原路由传送（路径：C—D—A）。

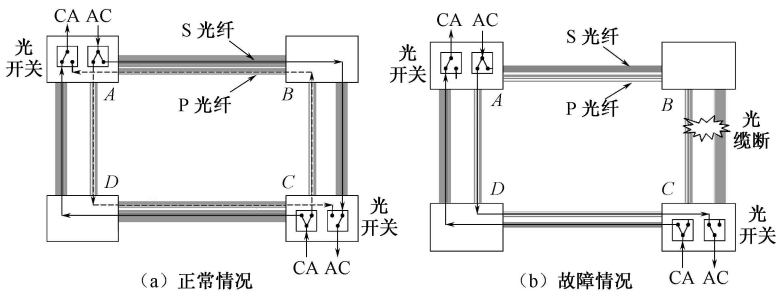


图 6-8 单向光通道保护倒换 UPSR

单向光通道保护的优点是双发选收，实现简单，而且倒换速度快。其缺点是不能重复使用节点间的波长，而且由于保护光纤 P 也传送业务，所以不能传送低等级业务。

3. 双向光线路共享保护环 BLSR

BLSR (Bidirectional Line Switch Ring) 属于共享式保护倒换，适用于分散型业务分布模式。其工作原理类似于 SDH 的双向复用段共享保护环；不同的是，光纤承载的不是单个光波长而是一个光波长组，所以在进行保护倒换时要把整个光波长组的一半波长进行保护倒换。

环网由两根光纤组成，分别记为 S1/P2 和 S2/P1。每根光纤所承载的波长组的一半作为工作波长通道 (S)；另一半作为保护波长通道 (P)，且为另一根光纤的工作波长通道提供反方向保护。

如第一根光纤 S1/P2 的工作波长通道为 S1，保护波长通道为 P2，P2 为第二根光纤 S2/P1 的工作波长通道 S2 提供反向保护。第二根光纤 S2/P1 的工作波长通道为 S2，保护波长通道为 P1，P1 为第一根光纤 S1/P2 的工作波长通道 S1 提供反向保护。双向光线路共享保护倒换 BLSR 如图 6-9 所示。

1) 正常情况

正常时，利用二根光纤的 S1 与 S2 以双向方式传送业务，P1 与 P2 通道空闲。

双向传送的含义与 SDH 环网类似，即两节点之间的往来业务信号（ $A-B$ 与 $B-A$ ）在同一区段内一个沿顺时针方向传送，另一个沿逆时针方向传送。

（1）AE 信号。AE 波长信号在节点 A 馈入 S1/P2 光纤的 S1 通道，并沿顺时针方向、经由节点 B, C, D 传送到节点 E ，在节点 E 进行接收。

AE 波长信号的传送路径为： $A-B-C-D-E$ ，如图 6-9（a）中的实线所示。

（2）EA 信号。EA 波长信号在节点 E 馈入 S2/P1 光纤的 S2 通道，并在同一区段沿逆时针方向、经节点 D, C, B 传送到节点 A ，在节点 A 进行接收。

EA 波长信号的传送路径为： $E-D-C-B-A$ ，如图 6-9（a）中的粗线所示。

2）故障情况

当发生故障时，如 C, D 节点之间的光缆被切断，则接收端的接收光开关将进行倒换。

（1）AE 信号。在节点 C 把 AE 波长信号从光纤 S1/P2 的 S1 通道桥接到另一根光纤 S2/P1 的 P1 通道；并使其沿逆时针方向经由节点 B, A, H, G, F, E 到达节点 D 。

在节点 D 再把 AE 波长信号从第二根光纤 S2/P1 的 P1 通道倒换到第一根光纤 S1/P2 的 S1 通道上，沿顺时针方向传送到节点 E 。

其传送路径为： $A-B-C-B-A-H-G-F-E-D-E$ ；如图 6-9（b）中的粗线所示。

（2）EA 信号。在 D 节点把 EA 信号从第二根光纤 S2/P1 的 S2 通道桥接到第一根光纤 S1/P2 的 P2 通道上，并使其沿顺时针方向经由节点 E, F, G, H, A, B 到达节点 C ；在 C 节点再把 EA 信号从光纤 S1/P2 的 P2 通道倒换到光纤 S2/P1 的 S2 通道上，并沿逆时针方向经由节点 B 传送到节点 A 。

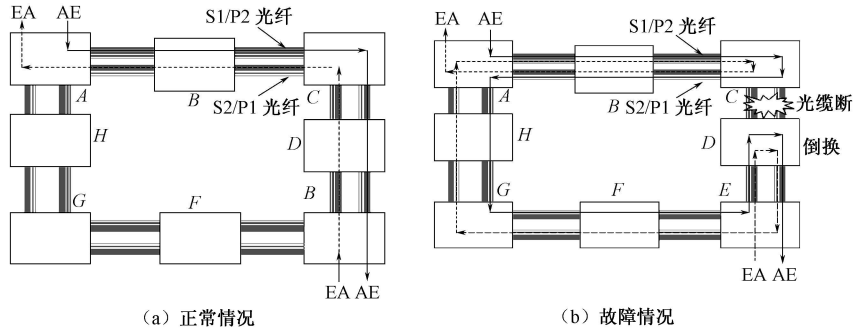


图 6-9 双向光线路共享保护倒换 BLSR

因此，EA 信号的传送路径为： $E-D-E-F-G-H-A-B-C-B-A$ 。如图 6-9（b）中的虚线所示。

双向光线路保护环最大的优点是节点之间的波长可以重复使用，其原理与 SDH 二纤共享复用段环的时隙重复使用相类似，可以大大提高 OADM 环的传输容量，也可利用保护通道 P1, P2 传送低等级业务。其缺点是技术比较复杂，倒换速度较慢。

4. 双向光通道保护环 BPSR

BPSR（Bidirectional Path Switch Ring）属于专用式通道保护，它的工作原理类似于 SDH 的双向通道保护环，即采用所谓双发选收方式：不同的是，光纤承载的不是单个光

波长而是一个光波长组，而且在发端双发时使用的是光分路器，收端的倒换开关不是电子开关而是光开关，工作原理如图 6-10 所示。

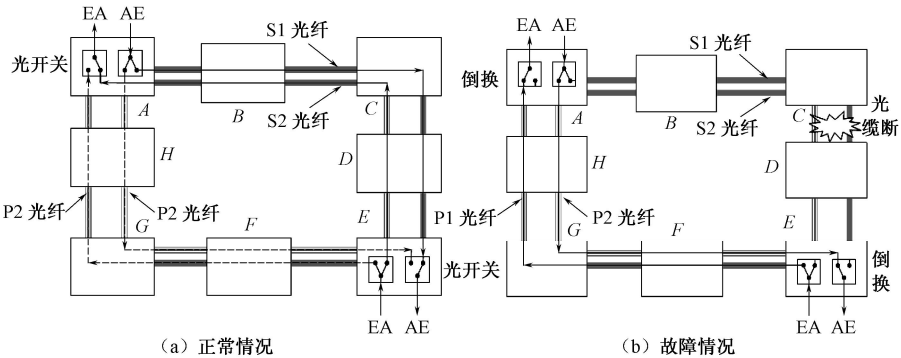


图 6-10 双向光通道保护倒换 BPSR

环网由两根光纤组成，工作部分称为 S1、S2，保护部分分别称为 P1，P2。

1) 正常情况

(1) AE 信号。AE 波长信号在节点 A 利用光分路器同时馈入光纤 S1 与 P1，即所谓 1+1 双发。一路是沿 S1 光纤、顺时针方向经由节点 B，C，D 传送到节点 E，其传送路径为：A—B—C—D—E；另一路是沿 P1 光纤、逆时针方向经由节点 H，G，F 传送到节点 E，传送路径为：A—H—G—F—E。

这样，在节点 E 会同时收到两个 AE 波长信号，根据信号质量的优劣、利用光开关选取其中一路作为主用波长信号（选收）。在正常情况下，选用沿 S1 光纤、顺时针方向传来的波长信号为主用信号（路径：A—B—C—D—E），如图 6-10（a）中的实线所示。

(2) EA 信号。EA 波长信号的传送路径与 AE 相似，即在节点 E 双发，在节点 A 选收。在正常情况下，选用收沿 S2 光纤、逆时针方向传送来的信号为主用信号，其传送路径为：E—D—C—B—A，如图 6-10（a）中的实线所示。

2) 故障情况

当发生故障时，如 C、D 节点之间的光缆被切断，则接收端的接收光开关将会发生倒换，如图 6-10（b）所示。

(1) AE 信号。在节点 E，由于从节点 A 沿 S1 光纤、顺时针方向来的 AE 信号（路径：A—B—C—D—E）丢失，按照择优选原则，光接收开关将由 S1 光纤转向 P1 光纤，选用从 P1 光纤、沿逆时针方向传送来的信号，传送路径为：A—H—G—F—E，如图 6-10（b）中的实线所示。

(2) EA 信号。在节点 A，由于从节点 E 沿 S2 光纤、逆时针方向来的 EA 信号（路径：E—D—C—B—A）丢失，按照择优选原则，光接收开关将由 S2 光纤转向 P2 光纤，选用从 P2 光纤、沿顺时针方向传送来的信号（路径：E—F—G—H—A），如图 6-10（b）中的实线所示。

5. 保护倒换时间与条件

1) 保护倒换时间

无论采用哪一种保护方式，其保护倒换时间都应该不大于 50 ms。

2) 光通道保护环的条件

光通道保护环的条件给出如下：

- (1) 输入光通道信号丢失 LOS；
- (2) 输入光通道信号劣化 SD；
- (3) 输入光功率信号过高或过低；
- (4) 接收端 OSNR 劣化到门限值以下；
- (5) B1 误码越限（承载信号为 SDH 或 POS 或 ATM 时）。

3) 光线路保护环的条件

光线路保护环的条件给出如下：

- (1) 光线路信号丢失 LOS；
- (2) 接收端 OSNR 劣化到门限值以下。

第7章 WDM 典型设备介绍

为了满足对带宽源源不断的不断增长需求，越来越多的光纤通信系统扩容成波分复用系统。早期的系统主要为 8×2.5 Gb/s, 16×2.5 Gb/s, 32×2.5 Gb/s 三种类型，目前扩容的容量主要是 40×10 Gb/s, 80×10 Gb/s, 160×10 Gb/s 系统。截至 2008 年 7 月底，华为、中兴、烽火三大通信设备主流生产商均能提供成熟的 160×10 Gb/s 系统。单波长 40 Gb/s 的波分复用系统正在推广应用。本章主要介绍中兴公司 160×10 Gb/s 产品，同时兼顾华为、烽火产品的内容。 160×10 Gb/s 波分复用系统中兴公司的典型产品为 Unitrans ZXMP M900，华为公司的典型产品为 Optix 1600G，烽火公司为 GDB/GZD/OAD 9953-01-160 型产品。

7.1 WDM 系统组成

波分复用系统由光终端复用设备（OTM）、光中继放大设备（OLA）、光分插复用设备（OADM）系统构成，可组成点到点、链型、环型、网状型等复杂网络。

光终端复用设备（OTM）包括发送和接收两部分。在发送端，来自客户端的信号（如 STM-N）通过发送 OTU 转变成满足 G.692 或 G.694.1 建议要求的特定波长光信号，经过合波、光放大、光监控信道后进入光纤线路传输；接收端是发送端的反过程，来自光纤线路的信号先进行光监控信道、DWDM 主信号分离，再被放大，经过分波、3R 接收 OTU 去掉噪声后送至客户端。

光中继放大设备（OLA）主要由光线路放大器、色散补偿模块（DCM）、光功率均衡器，光监控信道组成，包括东、西两个方向。信号经线路接收后，先进行光监控信道、DWDM 主信号分离，主信号经色散补偿、光放大、光功率均衡后继续往下游传送，光监控信道经光/电转换后，提取和插入本站信息，成帧后经电/光转换成 1 510 nm 或 1 625 nm 波长的光信号，与 DWDM 主信号一起进入下一段光纤传输。

光分插复用设备（OADM）的功能与 OLA 类似，不同的是 OADM 设备需要配置光分插复用机盘（OAD），OAD 既可以是固定波长上下，也可以是可配置波长上下，上下波长数和 OTU 数量可根据实际需要配置。需要指出，需要上下的波长要特别注意色散补偿量是否合适。采用模块化设计思想，方便用户扩容，节省首期投资。合波、分波器的基本单元是 40 波（100 GHz 波长间隔），采用 INTERLEAVER 技术实现 80 波（50 GHz 波长间隔），当容量需要扩容至 160 波时，采用 C+L 合波、分波实现。

1.6T（ 160×10 Gb/s）DWDM 系统还可实现 2.5 Gb/s DWDM 和 10 Gb/s DWDM 完全兼容，并可混合组网，使用喇曼放大器、超强 FEC，RZ 码，GTC/DGE 等技术可实现更长距离传输。

图 7-1、图 7-2 和图 7-3 分别是 DWDM 设备的 OTM、OLA、OADM 的设备示意图，由于处在不同年份，或者各厂家在同一时期技术水平存在差异，甚至同一厂家选用不同原理的器件也会导致设备性能不同，连纤关系不同。所以在学习和维护波分复用设备的

过程中，首先要掌握 DWDM 各种设备的基本信号流程，然后根据各个厂家的技术手册和硬件手册熟悉各种单板的连纤关系，在设备调测和排障过程中要注意各个单板的功能和性能指标。

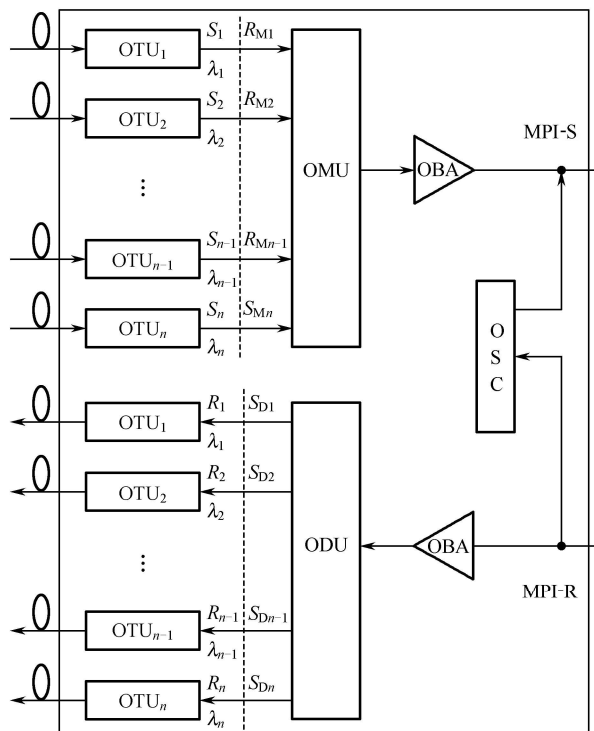


图 7-1 OTM 设备示意图

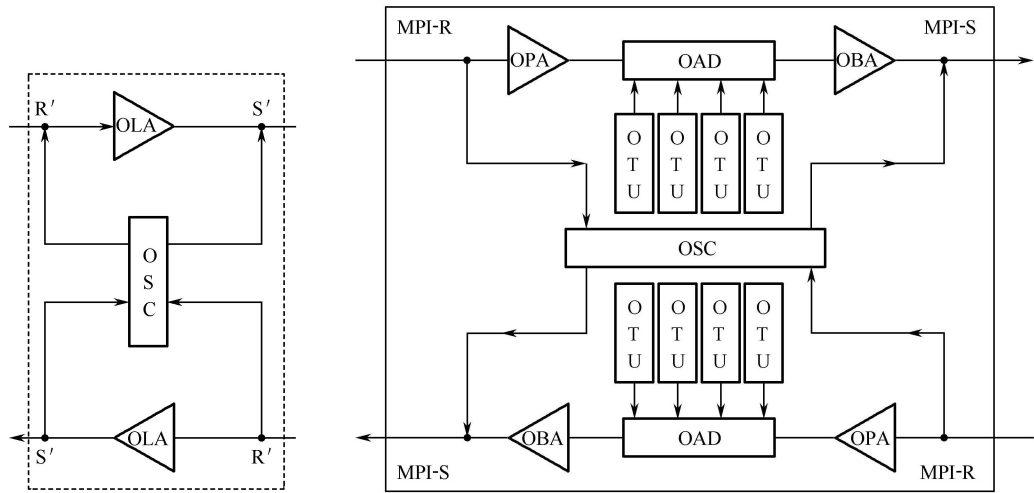


图 7-2 OLA 设备示意图

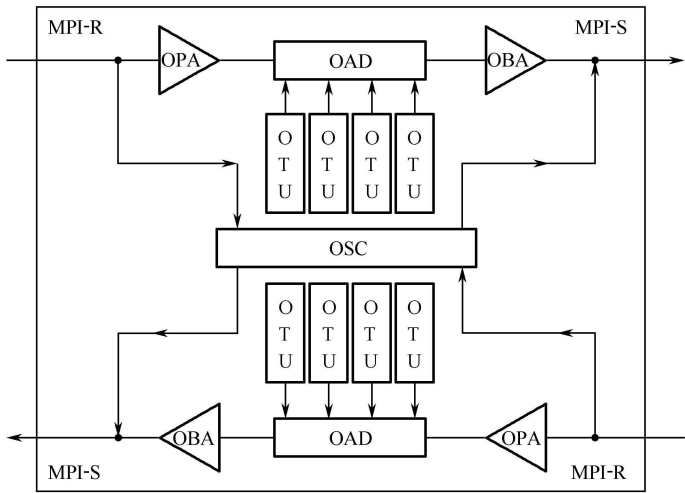


图 7-3 OADM 设备示意图

本章从 7.2 节开始，将会陆续讲述波分复用各种单板的功能和工作原理。在学习这些单板的时候，应把注意力放在单板功能和工作原理上，至于单板的英文名称，不同的设备，不同的厂家可能有不同的叫法。有一定专业基础的工程人员根据英文缩写和连纤

关系很快就能判断出这些单板的功能和作用,在维护过程中应注重培养这方面的能力。

本文没有描述所有类型的单板,只重点选取构成 WDM 系统基本功能的单板。主要内容来自对厂家设备说明书的整理节选,对日常维护设备具有一定参考价值,详细的内容请参见各厂家具体的技术手册和硬件手册。

在维护波分复用设备的时候,大多数人一般只会关注单板名称,认为名称一样的单板功能就是一样的。其实这种观点是不正确的,特别是在波分复用系统中,头脑中一定要在每个单板上再打上波长的烙印:这是一块什么单板?这块单板的工作波长或者工作波段是什么?

7.2 光转发板 OTU

光转发板是波分复用系统中数量最多的单板,任何一个有能力生产波分复用设备的厂家都可能有 200 多种以上的 OTU 单板。可以想象一下,生产 $160 \times 10 \text{ Gb/s}$ 的波分复用设备,需要 160 个不同波长的光发送 OTU、160 个光中继 OTU、160 个接收 OTU,如果这些波长承载的可能是 10 Gb/s 的 SDH 信号,也可能是其他的比如 POS, GBE, ATM, ESCON, FC 等多种格式的光信号,甚至不定速率的业务光信号。在波分复用群路光信号侧,发送端可能是不同波长,可能是带不同 FEC 功能(例如带内 FEC、标准 FEC、增强 FEC 功能)的单板,可能是不同光脉冲形状。OTU 的接收端可能对应不同数据格式,不同色散受限距离,不同接收机灵敏度可能对应不同的单板。正因为如此,所以 OTU 的单板类型才数量众多。在平常学习中,我们只需要关注最常用的 OTU 单板,其他类型的 OTU 单板在具体应用场合再查资料就可以了。

7.2.1 单板功能

OTU 根据在波分复用系统中所处的位置不同可分为 TXOTU, IROTU 和 RXOTU,早期的波分复用系统,例如 $N \times 2.5 \text{ Gb/s}$ ($N \leq 32$) 系统各个厂家都是 TXOTU 与 RXOTU 分别属于两块单块,等到 $N \times 10 \text{ Gb/s}$ ($N \geq 32$) 产品出现后, TXOTU 与 RXOTU 就集成在一块单板称为单路双向 OTU。另外,当单波长速率为 2.5 Gb/s 时,一般没有 FEC 功能,如果带有 FEC 功能,根据国际标准规定,应该能够选择打开或关闭该功能。对于群路速率为 10 Gb/s 以上的 OTU 单板,它均带有 FEC 或超强 FEC 功能,部分单板可能还支持 OTH(光传送体系)的帧结构 OTUK。它的功能主要是完成光接口变换。

1. 终端 OTU 功能

终端 OTU 的功能是:实现双路 STM-16 (2.5 Gb/s) 或以下速率的多业务信号的波长转换。包括发送端 OTU (OTUT)、接收端 OTU (OTUR)、单路双向 OTU。

1) 速率为 2.5 Gb/s 以下的终端 OTU 功能

(1) 线路侧承载带波长信息的 G.692 信号,支持固定波长激光器和可调谐波长激光器。

其中,波长可调谐功能支持 C 波段 4/8 通路连续波长可调谐(4 通路可调谐的通路间隔为 100 GHz , 8 通路可调谐的通路间隔为 50 GHz ,早期的 OTU 单板多数为固定波长

激光器)。

(2) 客户侧承载客户侧信号。支持 STM-1/STM-4/STM-16/GE 业务光信号，或连续速率业务。

(3) 具有 SDH 信号的 B1, J0 检测功能以及 GE 信号的错包检测功能。

(4) 带有 FEC 功能的光转发板 OTUF 板除具有以上功能外，线路侧还支持符合 G.709 规范的 FEC 功能和开销处理功能。

(5) 支持客户侧环回和线路侧环回，方便用户定位故障。

2) 速率为 10 Gb/s 的终端 OTU 功能

实现单路双向 STM-64 (10 Gb/s) 或 10 GE (10.312 5 Gb/s) 速率光信号的波长转换。

(1) 客户侧支持 STM-64 或 10GE 光信号。

(2) 线路侧光信号满足 G.692 要求，支持 FEC 或 AFEC 功能。两种 FEC 的格式通过网管设置。

(3) 具有 SDH 信号的 B1, B2, J0 检测功能以及 10GE 信号的错包检测功能。

(4) 支持 G.709 开销检测和处理。

(5) 支持 ERZ (电归零码) 调制技术，有效提高系统对光信噪比的容忍程度。

(6) 延长传输距离。(各个厂家为支持超长距离传输采用不同的码型，中兴采用的 ERZ 技术，华为采用的 CRZ 技术，烽火公司采用 RZ 码或 CS-RZ 码，各个公司甚至同一公司不同版本的光接口不一定能够实现对接。)

(7) 线路侧支持固定波长激光器和可调谐波长激光器。其中，可调谐波长激光器支持全 C 波段 40/80 通路波长的可调谐。40 通路的通路间隔为 100 GHz，80 通路的通路间隔为 50 GHz。

(8) 支持客户侧环回和线路侧环回，方便用户定位故障。

2. 中继 OTU 功能

中继 OTU 完成波分复用光接口的光电再生。分为单路单向或单路双向两种类型。

实现双路线路侧光信号的整形、定时提取和数据再生。中继 OTU 的光接口全部位于线路侧。

(1) 线路侧收、发光信号均满足 G.692 要求；

(2) 线路侧支持 STM-1/STM-4/STM-16/GE 业务光信号，或连续速率业务；

(3) 支持固定波长激光器和可调谐波长激光器，功能描述与终端 OTU 板相同；

(4) 作为终端 OTU，SRM42，GEM2，以及具有通道保护功能的光转发板的中继单板使用；

(5) 带 FEC 功能的 OTU，光口输出符合 G.692 和 G.709 要求的光信号。

(6) 支持客户侧环回和线路侧环回，方便用户定位故障。

7.2.2 工作原理

OTU 主要完成光接口转换，终端 OTU 完成各种非波分复用光接口到波分复用光接口的转换，中继 OTU 完成波分复用光接口的再定时、再整形、再放大。

1. 终端 OTU 的工作原理

终端 OTU 根据是否带有 FEC 功能可分为不带 FEC 功能的 OTU 单板和带 FEC 功能的 OTU 单板两大类，它们的功能稍有不同，它们的工作原理示意图如图 7-4、图 7-5 所示。带 FEC 功能又分为带内 FEC 功能，标准的带外 FEC 功能和超强 FEC 功能。对于单波长速率为 2.5 Gb/s 的单板来说，多数不带 FEC 功能；10 Gb/s 的 OTU 单板一般都带有不同纠错能力的 FEC 功能。

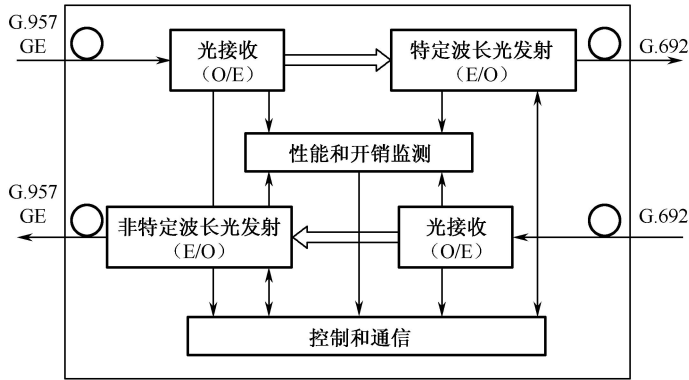


图 7-4 终端 OTU 工作原理示意图

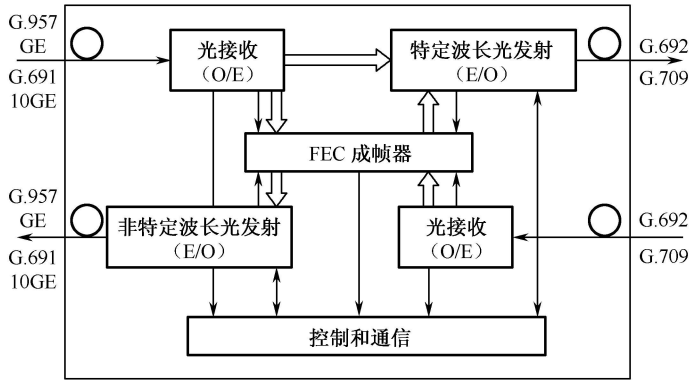


图 7-5 带 FEC 功能的终端 OTU 工作原理示意图

OTU 板主要包括光接收模块、光发射模块、性能和开销监测单元、控制和通信单元、FEC 成帧器。

- (1) 光接收模块：将接收的光信号进行光/电转换，转换为电信号。
- (2) 光发射模块：包括特定波长光发射模块和非特定波长光发射模块。特定波长光发射模块将电信号转换为满足 G.692 要求的光信号；非特定波长光发射模块将电信号转换为无波长要求的光信号送入用户接收设备。只有 OTUR 和单路双向 OTU 具有该模块。
- (3) 性能和开销监测单元：处理来自光接收、光发射模块的性能和开销监测信息，转发给控制和通信单元。
- (4) 控制和通信单元：接收各个模块的监控信息以及来自性能和开销监测单元的监测信息，上报网管。同时，也可接受网管对输出波长、功率以及开销字节的控制命令。

(5) FEC 成帧器：完成 FEC 编码/解码/解编码操作，FEC 功能可在网管上在线配置。同时，具有业务性能监测和开销处理功能，将性能监测数据、开销字节送入控制和通信单元。

2. 中继 OTU 的工作原理

中继 OTU 板的工作原理如图 7-6 和图 7-7 所示。图中各模块功能与终端 OTU 功能相同，此处不再赘述。对于线路速率为 2.5 Gb/s 单板，由于 FEC 功能是可选的，所以在一些场合，还会有一端带 FEC 功能，而另一端不带 FEC 功能的 IR OTU 单板应用，例如烽火公司的 FTS 和 STF 单板。

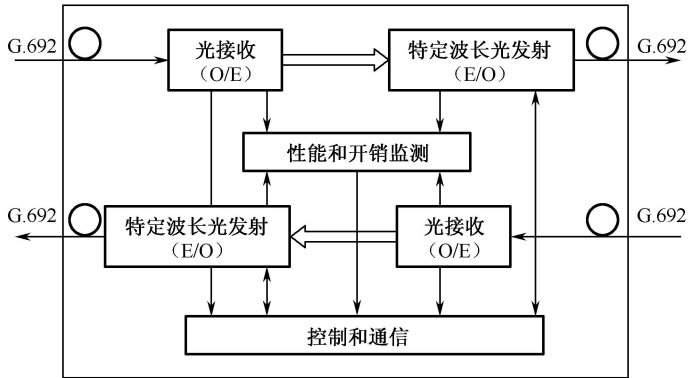


图 7-6 中继 OTU 板工作原理图

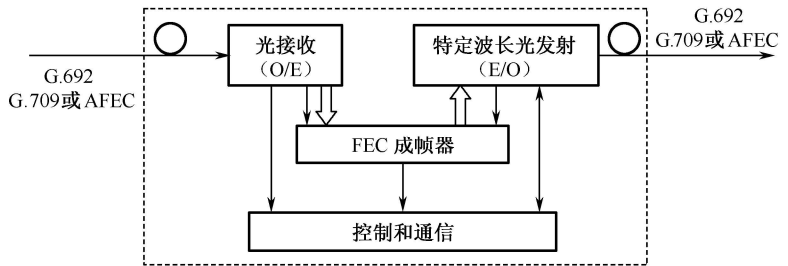


图 7-7 带 FEC 功能的中继 OTU 工作原理图

7.3 光合波板 OMU 和预均衡合波板 VMUX

7.3.1 光合波板 OMU

光合波板是波分复用系统中重要的单板，没有合波板就不可能有波分复用这项技术，在波分复用系统中，我们希望合波板插入衰耗低，通带衰耗平坦，衰耗与偏振态无关。

1. 单板功能

OMU 板主要实现合波功能并且提供合路光的在线监测口。

OMU 板包括 OMU8, OMU16, OMU32, OMU40 四种单板。表 7-1 所示为 OMU 板类型列表。

表 7-1 OMU 板类型列表

参 数	指 标			
单板类型	OMU8	OMU16	OMU32	OMU32
合波数量	8	16	32	32
合波器类型	耦合器	耦合器	耦合器、AWG、TFF	AWG、TFF
工作波长	C 波段	C 波段	C 波段、L 波段	C/C+波段、L/L+波段
通路间隔/GHz	100	100	100	100

值得指出的是，早期的 16 波或 32 波产品，复用过程都不是一次完成的，而是 8 波合波再与另外 8 波进行合波输出 16 波，如果要输出 32 波，再把另外 16 个波进行合波，最后两个 16 波共同合成 32 波。随着技术的改进，集成度越来越高，目前一块合波板一般占用两个槽位就可以完成 40 波的合波。而 160 波系统的合波过程是：将 160 波分成信道间隔均为 100 GHz 的四组：C 波段、C+波段、L 波段、L+波段，每个波段有 40 个波长，C 波段与 C+波段分别经 OMU 合波后，再经过 OCI 板合波成信道间隔为 50 GHz 的 C 波段 80 波；同样 L 波段与 L+波段分别经 OMU 合波后，再经过 OCI 板合波成信道间隔为 50 GHz 的 L 波段 80 波；最后再经 OBM 板将 C 波段与 L 波段合成 160 路线路信号。华为、烽火对这几个波段的叫法有点不同，单板的英文名称也有所不同，但是光纤之间的连接关系是一样的。

另外，在维护过程中值的注意的是，同样都是 OMU 板，但是由于工作波长不一样，所以每块 OMU 所能够连接的 OTU 波长也不同。在使用过程中，一方面要注意它的工作波段，注意各合波板间的级联顺序，另一方面在安排单板的时候，尽可能将使用同一块 OMU 的 OTU 单板安排在一起，这样就可以避免复杂的子架间和机架间连纤。

由于 OADM 的设备应用越来越广泛，OMU8，OMU16，OMU32 这些早期的单板也可能在 160 波的波分复用系统中出现。

2. 工作原理

OMU 板的工作原理图如图 7-8 所示。

OMU 板将不同波长的光信号通过合波器合到一根光纤中，在合路输出前，将部分光送入光功率监测模块。由光功率监测模块提供在线监测口，并通过控制与通信单元向网管上报输出光总功率。

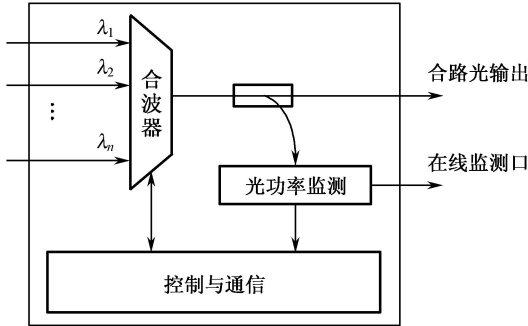


图 7-8 OMU 板的工作原理图

7.3.2 预均衡合波板 VMUX

VMUX 通常配置在超长无电中继的 40 波系统和 80 波系统 OTM 设备的发送端。预均衡合波板实际上是可调节单通道光衰减量的合波板。VMUX 板的配置与 OMU 板类似。CHn 接口与 OTU 类型单板的线路侧接口、会聚类单板的群路接口相连，OUT 接口作为合路光信号输出。VMUX 板还应与 OPM 板配合使用。根据 OPM 板监测的光功率，通过网管调节各通道的功率谱斜率。

1. 单板功能

- (1) VMUX 板具有通道功率预均衡的合波功能，合波数为 40 波。利用 AWG+VOA (可调光衰减器) 技术，在合波之前，通过温控电路调节各通道的衰减量。
- (2) 提供合波信号输出功率的检测功能。
- (3) 提供通道功率控制与调整的功能。在光性能检测板 (OPM)、网管的配合下，可单独调整每个通道的功率，或统一调整所有通道的功率。
调整分辨率为 0.1 dB，调节范围为 0~10 dB。

- (4) VMUX 板的合波器为 AWG。根据通道信号的波段范围，VMUX 板分为 C 波段、C+波段、L 波段、L+波段类型。

2. 工作原理

VMUX 板的工作原理图如图 7-9 所示。VMUX 板通过温控电路驱动每个通道的 VOA，由 VOA 调节各通道的衰减量，再合为一路信号输出。VOA、AWG 以及温控驱动电路均位于 VMUX 板的光模块中。由控制与通信单元发送各通道的 VOA 调整命令并查询光模块的性能、告警信息。

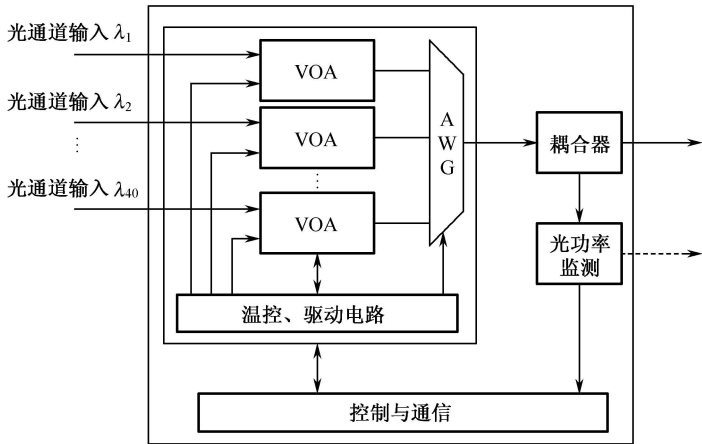


图 7-9 VMUX 板的工作原理图

7.4 光分波板 ODU

光分波板 ODU 配置在 OTM 设备的接收端。主要完成波分复用系统中波解复用功能，在波分复用系统中，一般希望分波板除具有插入衰耗低，通带衰耗平坦，衰耗与偏

振态无关的特性外，还希望它的串扰尽可能小。

1. 单板功能

ODU 板主要实现分波功能并且提供合路光的在线监测口。ODU 板包括 ODU8，ODU16，ODU32，ODU40 四种单板。表 7-2 所示为 ODU 板类型列表。

表 7-2 ODU 板类型列表

参 数	指 标			
单板类型	ODU8	ODU16	ODU32	ODU40
分波数量	8	16	32	40
分波器类型	AWG, TFF			
工作波长	C 波段	L 波段	C 波段、L 波段	C/C+波段、L/L+波段
通路间隔/GHz	100	100	100	100

前面在讲到合波的时候提到，波分复用系统的合波过程往往不是一次完成的，而是经过多次级联完成的，分波过程也一样，也是经过多次分波后才能最终完成解复用过程。所以在平时维护过程中，一定要注意，同样是 ODU 板，由于工作波长不一样，每块 ODU 所能够连接的 RXOTU 波长也不同。在使用过程中，一方面要注意它的工作波段，注意各分波板间的级联顺序，另一方面在安排单板的时候，尽可能将使用同一块 ODU 的 RXOTU 单板安排在一起，这样就可以避免复杂的子架间和机架间连纤。

2. 工作原理

ODU 单板工作原理如图 7-10 所示。ODU 板通过分波器将一根光纤中不同信道的光信号剥离，分别送入不同的光接收机。在进入分波器前，将部分光送入光功率监测模块，由光功率检测模块提供在线监测口，并通过控制与通信单元向网管上报输入光总功率。

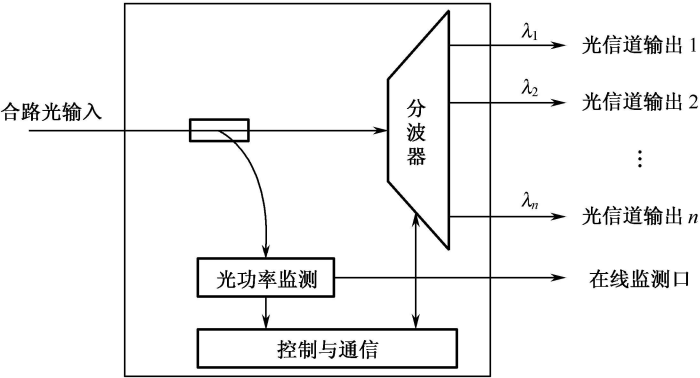


图 7-10 ODU 单板工作原理图

7.5 光合分波交织板 OCI

只有当波分复用系统复用的波长数目超过 40 波以上，才会用到光合分波交织板。

1. 单板功能

- (1) 利用光梳状滤波器（interleaver）完成 C 波段或 L 波段的信道交织复用和解复用功能。
- (2) 提供 80 波合路输出、输入光的在线监测接口。

2. 工作原理

OCI 板的工作原理图如图 7-11 所示。

复用端：利用 interleaver 的复用模块对 40 波 WDM 系统进行扩容。将两组频率间隔为 100 GHz、频移为频率间隔的一半的信道进行复用，使信道数增至 80 波、频率间隔缩小为 50 GHz。每块 OCI 板只能完成 C 波段或 L 波段的复用。

解复用端：利用 interleaver 的解复用模块，将 80 波 50 GHz 间隔的合路信号解复用为两组频率间隔均为 100 GHz、频移为频率间隔的一半的信道。每块 OCI 板只能完成 C 波段或 L 波段的解复用。

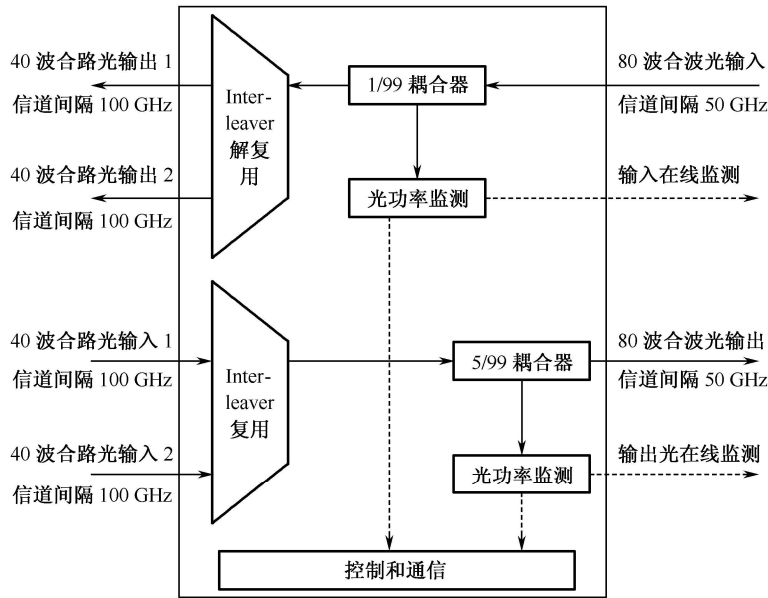


图 7-11 OCI 板的工作原理图

7.6 宽带复用板 OBD

OCI 板已经能够将 C 波段两路 40 波合成 80 波或者将 L 波段两路 40 波合成 80 波，而后要将 L 波段与 C 波段共同合成 160 波，还得一块光复用板——OBD。

1. 单板功能

- (1) 利用宽带复用器完成 C 波段、L 波段、1 510 nm 和 1 625 nm 监控信道的复用和解复用。1 510 nm 为 C 波段信号的监控通道，1 625 nm 为 L 波段的监控通道。
- (2) 在线监测 C+L+1 510 nm+1 625 nm 光信号的功率。

2. 工作原理

OBM 板的工作原理图如图 7-12 所示。

- (1) 复用端：利用宽带复用器的复用模块对 80 波 WDM 系统进行扩容。将输入的频率间隔为 50 GHz 的 C 波段和 L 波段信道复用，使信道数增至 160 波，同时复用监控信号。
- (2) 解复用端：利用宽带复用器的解复用模块，将 160 波合路信号解复用为频率间隔为 50 GHz 的 C 波段和 L 波段信道，解复用后的两个波段信道数均为 80 波，同时解复用监控信号。

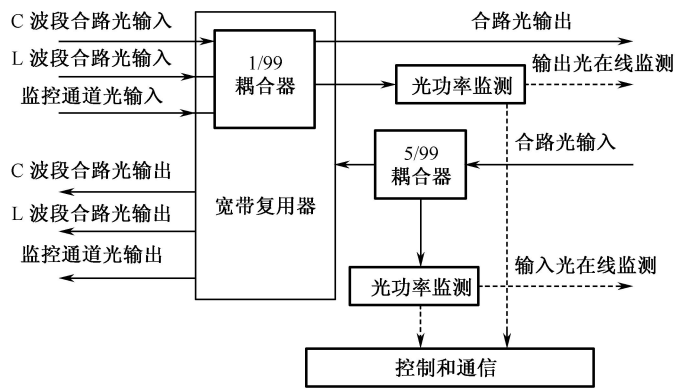


图 7-12 OBM 板工作原理图

3. 160 波系统各单板连接关系

通过图 7-12 可以对前面已经介绍过的 OTU，OMU，ODU，OCI，OBM 单板功能有了更深的理解。图 7-13 是 160 波系统复用与解复用各单板的连纤示意图，不同厂家的单板名称可能会与图 7-13 有所不同，但是无论哪个厂家的设备，总能找到与图 7-13 功能相同的单板，各单板的连接关系也没有太大的区别。

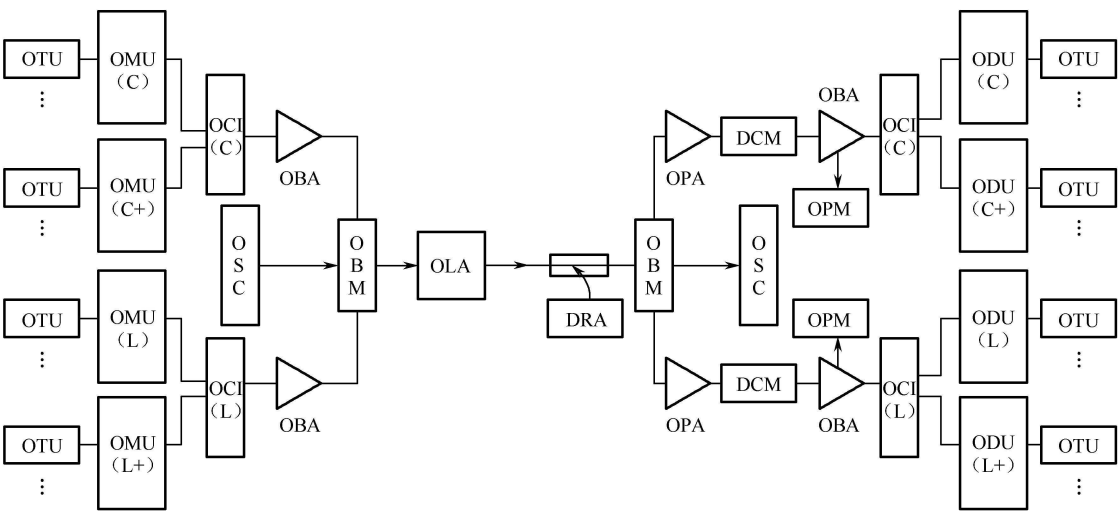


图 7-13 160 波系统复用与解复用各单板的连纤示意图

7.7 光分插复用板 OAD

OADM 设备主要利用 OAD 板实现多波长信号的上/下。

1. 单板功能

OAD 板配置在 FOADM(固定光分插复用器)子系统中，用于上/下固定波长的光信号。

(1) OAD 板可固定上/下 4 路或 8 路固定波长的信号（上/下路信号的具体波长按照用户的要求定制）。其他波长信号与本地加入的信号合波，实现固定波长的分插复用功能。

(2) 对上/下路的光信号功率进行监测。

2. 工作原理

以上/下 8 路光信号为例，8 路 OAD 板的工作原理图如图 7-14 所示。

OAD 板主要包括 OADM 单元、功率监测单元和控制与通信单元。

(1) OADM 单元：使用光模块完成指定波长的分插、复用以及其余波长的直通功能。

(2) 功率监测单元：监测上/下路光信号的光功率，并将监测到的功率值送至控制与通信单元。

(3) 控制与通信单元：将功率监测单元检测到的功率上报网管，同时，接受网管对单板下发的控制命令。

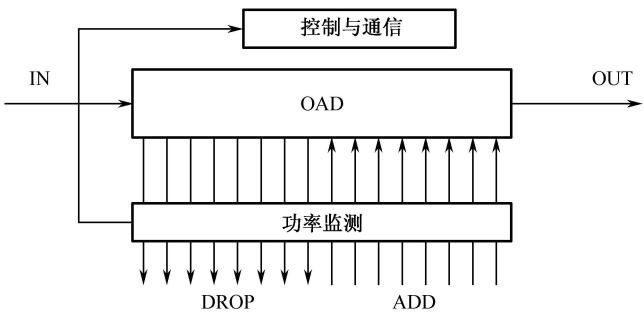


图 7-14 8 路 OAD 板工作原理图

3. OAD 板的应用方式

图 7-14 是 8 路 OAD 板的工作原理图，对于理解工作原理是有帮助的，但对于实际的 OADM 设备中 OAD 板如何连接应用并没有描述。图 7-15 和图 7-16 就是两种不同类型的 OAD 单板的工作原理，在图 7-15 中，上面一块 OAD 的线路侧接口分别为西向线路的光输入和东向线路光输出，与之相连的 OTU 单板分别对应着西向在本地的业务收和东向在本地的业务发。下面一块 OAD 的线路侧接口分别为东向线路的光输入和西向线路光输出，与之相连的 OTU 单板分别对应着东向在本地的业务收和西向在本地的业务发。在图 7-16 中，左边的 OAD 板线路侧对应着西向的线路侧光输入和光输出，与之相连的 OTU 对应的西向在本地的上下业务。右边的 OAD 板线路侧对应着东向的线路侧光输入和光输出，与之相连的 OTU 对应的东向在本地的上下业务。图 7-16 对应 OAD 构造方式比图 7-15 复杂，左边与右边的 OAD 单板存在直通光信号的级联接口，但它的好处是便于级联更多的 OAD 单板进行扩容，而且，当左边的 OAD 单板损坏或不在位时，不

会影响本地上下东向的业务，所以更有优势。在实际维护过程中，这两种类型的 OAD 都有应用，在维护中要注意对照厂家说明书，深刻理解本站点的 OAD 板类型和信号流程。

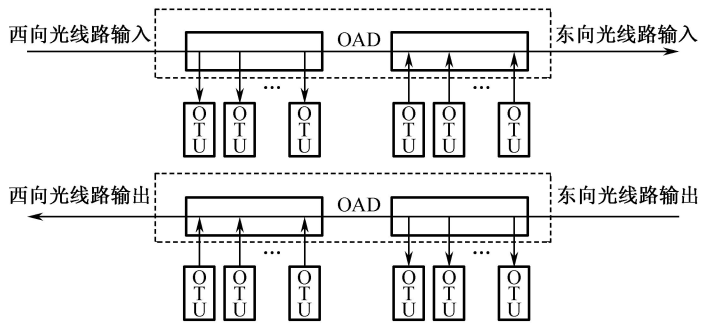


图 7-15 不可扩容式 OAD 连纤示意图

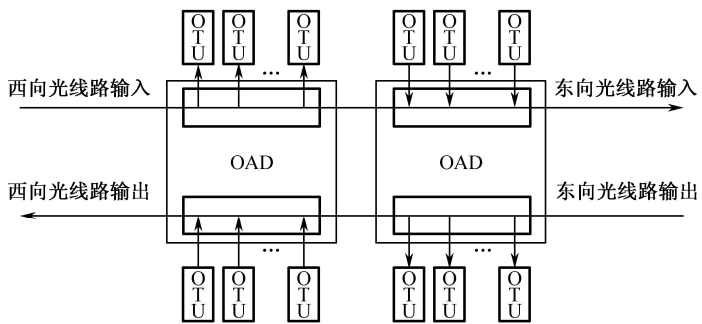


图 7-16 可扩容式 OAD 连纤示意图

7.8 光放大板 OA

1. 单板功能

根据单板功能和在系统中位置的不同，OA 板分为光功率放大板（OBA）、光线路放大板（OLA）、光前置放大板（OPA）三种类型，如表 7-3 所示。

表 7-3 OA 板单板类型列表

单 板 类 型	位 置	功 能
OBA	光复用段的起点，终端复用设备（OTM）或中继设备的发射光源后	对光源的发射光信号进行放大，用于提高入纤光功率，延长传输距离
OLA	光复用段的中间	将 EDFA 直接插入光纤传输链路中对信号进行放大，一个光复用段可以根据需要，配置多个 OLA
OPA	光复用段的末尾，光接收设备前	对经过线路衰减后的小信号进行预放大，提高进入接收机的光信号功率，以满足接收机接收灵敏度的要求

1) 节约系统成本和减小系统复杂度

OA 板利用掺铒光纤放大器（EDFA）实现对光信号的全光放大，代替原始的电再生中继方式，从而节约系统成本和减小系统复杂度。

2) 具有增益锁定、增益调整、功率钳制控制等功能

(1) 增益锁定: ZXMP M800 设备 OA 板采用固定增益的放大方式。通过提供不同放大增益的 OA 板, 适应不同的线路情况和波长系统。

(2) 增益调整: 当线路衰耗发生波动时, 在不中断业务的情况下, 可通过网管进行增益微调, 保证系统工作于最佳状态。

(3) 功率钳制控制: 当 OA 板的输入功率过强或过弱时, 利用功率钳制功能, 控制 OA 板的输出功率, 防止发生 EDFA 的光浪涌现象。

3) 具有自动功率关断 (APSD) 或自动功率减弱 (APR) 功能

APSD, APR 功能是指系统在探测到链路上输入无光 (断纤) 时, 关断或自动减弱 OA 板的输出光功率。信号恢复时, 又能重新启动, 恢复 OA 板的工作。从而保证在线路光纤的检修过程中, 光功率电平处于安全要求之内。

4) 单板内设有 1510/1550 合波器和分波器

实现监控通道波长 (1 510 nm) 光信号的上/下, 但不 1 510 nm 监控信号进行处理。

2. 工作原理

OA 板的工作原理图如图 7-17 所示。

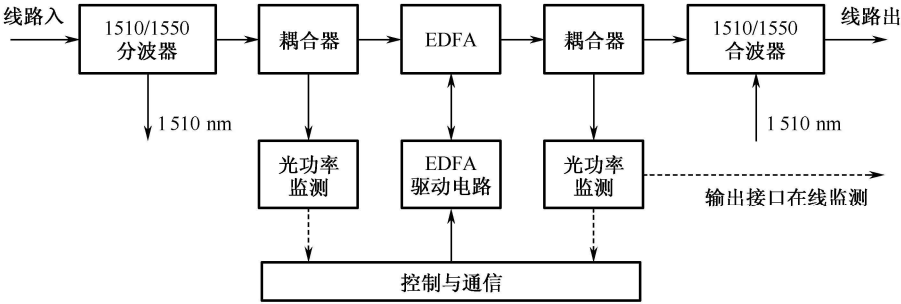


图 7-17 OA 板的工作原理图

光线路信号进入 OA 板后, 由 1510/1550 分波器分离线路信号中的 1 510 nm 和 1 550 nm 波长信号, 将 1 510 nm 信号送入 OSCF 板, 1 550 nm 信号送入 EDFA 模块进行放大, 并在 1510/1550 合波器合入 1 510 nm 波长的监控信号后, 合波输出。

目前商用的 EDFA 可以分为 C 波段和 L 波段两种, 对于使用喇曼光纤放大器的波分复用系统, EDFA 又与不使用喇曼光纤放大的系统的 EDFA 不同。另外, 还存在不同增益系数和不同饱和输出光功率的 EDFA, 在使用中要注意区分不同类型的 EDFA 的使用场合。

7.9 监控分插板 SDM

7.8 节中的 OA 板具有光监控信道的合波与分波的功能, 但并不是所有的光放大板都具有这些功能, 对于没有光监控信道与主光信道分波和合波功能的光放大板或者由于

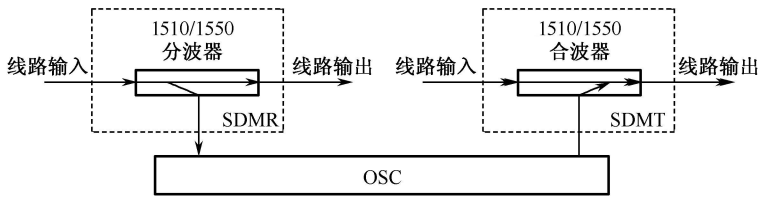
系统跨距的原因不需要配置光放大板的情况，此时必须在系统中增加 SDM 板。

1. 单板功能

SDM 板主要用于实现主光通道和监控通道信号的合、分波，并配合网管实现监控功能。适用于由于跨距的原因不需要配置 OA 板的情况，包括发送端 SDM 板（SDMT）与接收端 SDM 板（SDMR），分别取代 OBA 板与 OPA 板。

2. 工作原理

SDM 板的光路工作原理图如图 7-18 所示。



注：SDMR 板只配置 1510/1550 分波器，SDMT 板只配置 1510/1550 合波器

图 7-18 SDM 板的光路工作原理图

SDMR：实现节点从线路（1 510 nm+1 550 nm）分波出光监控通道（1 510 nm）与主光通道（1 550 nm）。

SDMT：将光监控通道（1 510 nm）与主光通道（1 550 nm）合波后送到线路（1 510 nm+1 550 nm）。

7.10 分布式 RAMAN 放大板 DRA

1. 单板功能

DRA 板利用分布式 RAMAN 放大器将 RAMAN 泵浦光反向馈入传输光纤，实现对光信号的分布式放大。通过与 EDFA 放大器的配合使用，适用于单跨段的超长距系统。

DRA 板具有以下功能。

（1）放大波长可由 C 波段、L 波段向 C+L 波段升级，范围 1 529~1 604 nm，实现超大容量、超长距离光纤通信。

（2）具有增益调整、增益谱调整、增益稳定功能。

- 增益调整：对泵浦激光器功率进行调整，与 EDFA 的增益调整相结合。增益调整时，实行缓变控制，提高安全性。
- 增益谱调整：对各泵浦激光器功率分别调整，以实现光谱调整，解决通道平坦度问题。
- 增益稳定：泵浦功率稳定。

（3）具有激光器自动关断功能（ALS）。

（4）具有相关性能监测和告警处理功能，并可根据网管要求执行相关操作。

2. 单板功能

DRA 板放大 C 波段和 L 波段时，工作原理框图的组成不同，分别如图 7-19 和图 7-20 所示。

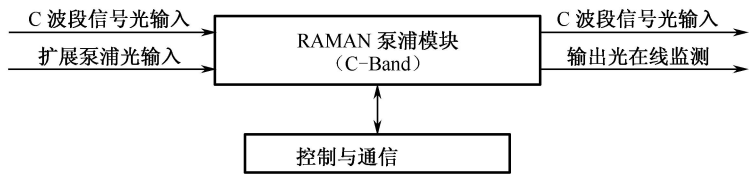


图 7-19 DRA 板工作原理图 (C 波段)

DRA 板的 RAMAN 泵浦模块有 C-Band 和 L-Band 两种类型。其中，C-Band 模块可以独立接入系统工作，L-Band 模块必须与 C-Band 模块配合使用。

(1) C-Band 光模块：可单独使用，实现 C 波段信号光的放大。具有输出功率检测功能、泵浦合波功能、泵浦/信号耦合功能。

(2) L-Band 光模块：仅提供泵浦源的驱动，放大 L 波段的信号光，必须与 C-Band 光模块共同使用。

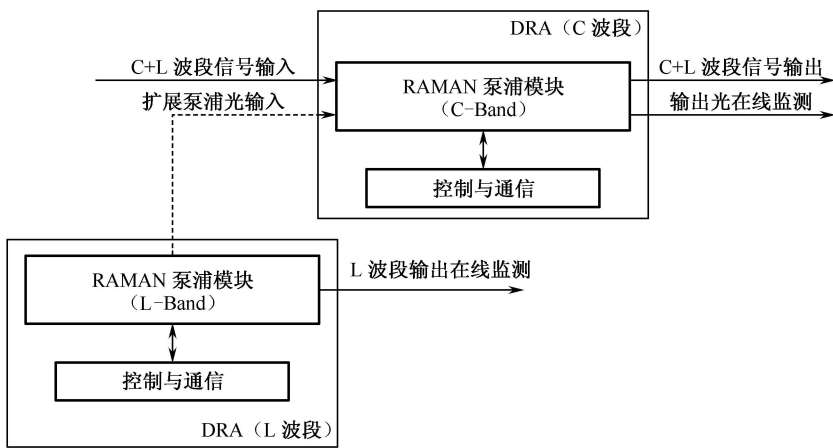


图 7-20 DRA 板工作原理图 (C+L 波段)

L-Band 光模块和 C-Band 光模块共同使用时，信号光由 C-Band 模块的信号光输入接口接入，C 波段信号在 C-Band 模块中放大，L 波段信号在 L-Band 模块中放大。通过扩展泵浦光接口返回 C-Band 模块，由 C-Band 模块统一输出光信号，实现 C 波段和 L 波段信号的整体放大。

7.11 动态增益均衡板 DGE

1. 单板功能

在大容量超长距离光传输 DWDM 系统中，由于光放大器不平坦度的多级级联、非线性效应累积、滤波型器件与色散补偿元件通道插损不一致等原因，通常将导致光传输

链路中各信道功率的不均衡，从而给接收端的光信噪比带来不利的影响。DGE 板用于克服光放大器中静态增益均衡滤波器（GEF）均衡灵活性不足的缺点，解决光网络系统中的增益不均衡问题。

DGE 板能够对各通道的光功率单独调整，调节精度为 0.1 dB，调节范围±5 dB，固有插损 11 dB。

2. 工作原理

DGE 板根据 OPM 板监测的光放大器（OA）输出功率谱，利用动态增益平坦滤波器（DGFF），动态地调整有关波长或波长组的衰减，使光放大器的输出功率谱满足平坦要求，如图 7-21 所示。

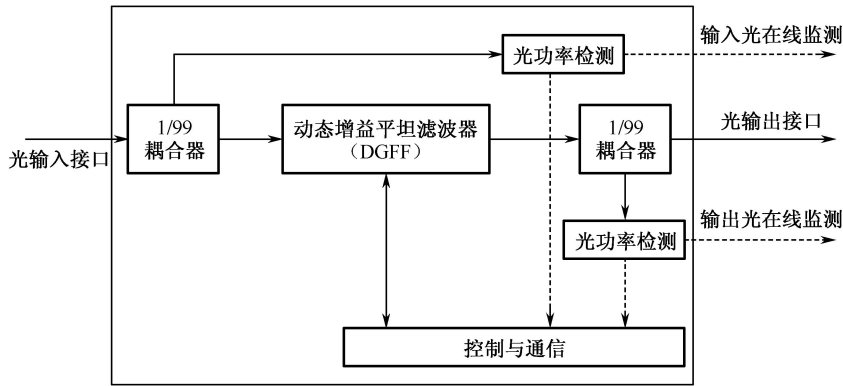


图 7-21 DGE 板工作原理图

7.12 线路衰减补偿板 LAC

1. 单板功能

（1）根据线路光功率检测的情况，通过网管调整 LAC 板中的电可调光衰减器（EVOA），以保证在运行过程中各跨段的功率点、接收端的接收功率和 OSNR 维持正常值。

（2）LAC 板的工作波长范围为 1 525~1 610 nm；固有插损小于 2 dB；EVOA 的调节范围为 2~26 dB；调节精度为 0.5 dB。

（3）LAC 板包括 LACG 板和 LACT 板 2 种类型。

- LACG 板：配置 2 个 EVOA，适用于 OLA，OADM 和背靠背的 OTM 站点。
- LACT 板：配置 1 个 EVOA，适用于单端 OTM 站点。

2. 工作原理

以 LACG 板为例，LAC 板的工作原理图如图 7-22 所示。

网管通过 LAC 板中的控制与通信单元下发衰减调整命令，由 EVOA 驱动电路驱动光接收模块中的 EVOA 做出相应的调整。

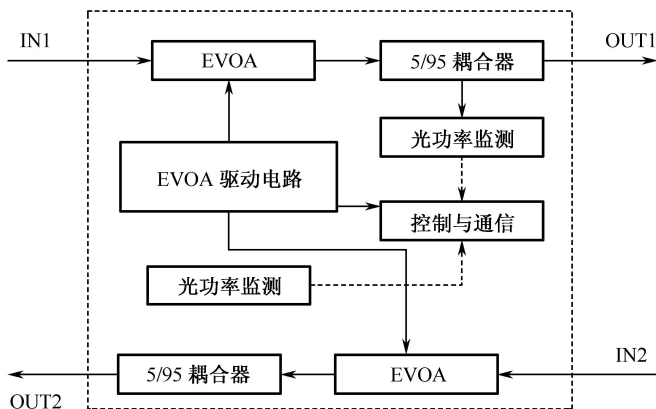


图 7-22 LAC 板的工作原理图

7.13 光性能检测板 OPM

1. 单板功能

单板可以完成各光信道光性能的监测功能，测量每个光通路的参数，如光功率、中心波长和光信噪比，并将相应数据上报网管系统。

功率测量的精度为 ± 1.0 dBm，中心波长测量的精度为 ± 0.1 nm，光信噪比（OSNR）测量的精度为 ± 1.5 dB（OSNR <25 dB）。

每块 OPM 板可以完成 4 个光口的性能检测。

2. 工作原理

OPM 板的工作原理图如图 7-23 所示。OPM 板接入 4 个光接口，在检测处理单元中测量每个光通道的参数，并通过控制与通信单元上报网管。网管也可通过控制与通信单元下发光通道参数的查询命令。

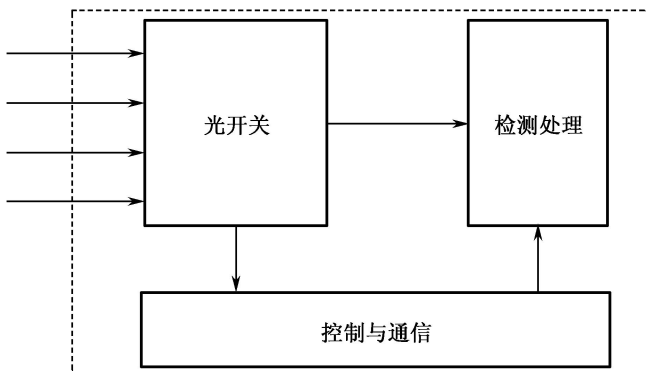


图 7-23 OPM 板的工作原理图

7.14 主控板 NCP

1. 单板功能及原理

NCP 板是 2Mb/s 监控系统的网元控制处理器，完成网元监控子系统的全部功能。

(1) 采集和处理所在网元的告警和性能信息，上报网管，转发来自其他 NCP 的数据，同时接收网管下达的控制命令。

(2) 具有保存配置数据的能力。一旦初始配置完成之后，可脱离网管独立工作。

(3) 向上层管理系统提供 Qx 和 f 接口。Qx 口采用 (10/100) Mb/s 的以太网电接口；f 接口采用 RS-232 接口，符合 V.28 协议。

(4) 提供与其他网元通信的 ECC 路由，与各单板通信的 S 接口。

(5) 通过告警输出接口，将设备告警输出至电源监控板 (PWSB)。

(6) 接收由风扇控制板 (FCB) 监控的风扇转速、风扇插箱温度，并将结果反馈至网管。同时，将来自网管的风扇转速调整命令，下发至 FCB。

(7) 提供多机柜管理功能。一块 NCP 板最多可管理 4 个机柜。

2. 单板功能及原理

NCP 板的工作原理图如图 7-24 所示。

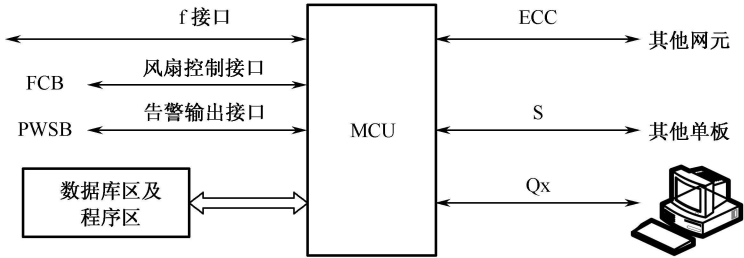


图 7-24 NCP 板的工作原理图

7.15 光监控通道板 OSC

1. 单板功能

OSC 板在 2Mb/s 监控系统中，主要实现以下功能：

(1) 将监控通道 (1 510 nm 或 1 625 nm) 中携带的监控信息转发至主控板 (NCP 或 NCPF) 和开销处理板 (OHP)，同时，完成反方向的转换。

(2) 在 2Mb/s 监控系统中，完成 APS 控制器和 APR 功能。

(3) 根据不同的需要，OSC 板分为终端光监控通道板 (OSCT) 和线路光监控通道板 (OSCL) 两种类型。

- OSCT：处理 1 个方向的监控信号，适用于 OTM 设备。
- OSCL：处理 2 个方向的监控信号。如果在同一 OA 子架中安装 2 块 OSCL 板，可同时处理 4 个方向的监控信号。适用于 OLA 设备和 OADM 设备。

2. 工作原理

OSC 板的工作原理图如图 7-25 所示。

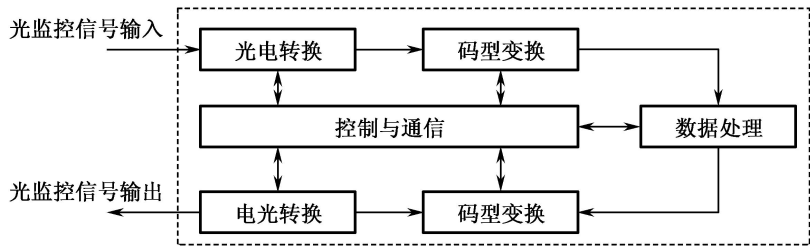


图 7-25 OSC 板的工作原理图

接收端：OSC 板接收相邻网元的光监控信号，经光电变换、码型变换、数据处理后，通过控制与通信单元分别传送给 NCP/NCPF 板、OHP 板。

发送端：通过控制与通信单元接收来自 NCP/NCPF 板、OHP 板的电信号，经数据处理、码型转换、电光转换后产生携带监控信息的光信号送至相邻网元。

7.16 开销处理板 OHP

OHP 板负责 2 M 监控系统中站点间公务和透明用户通道数据的处理，OHP 板的工作原理图如图 7-26 所示。

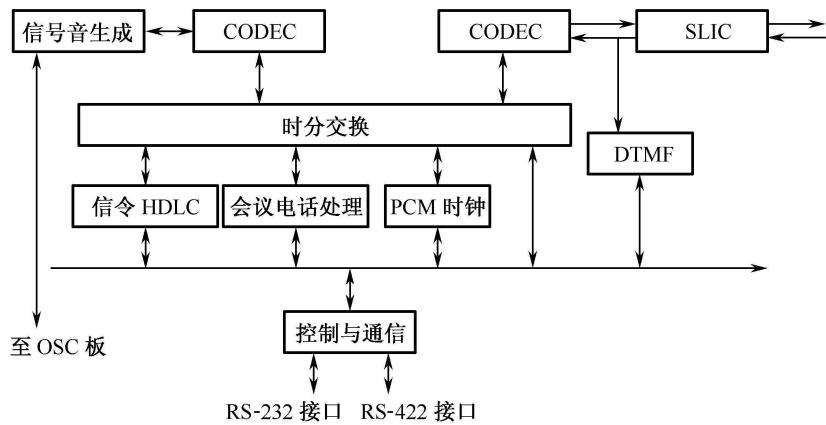


图 7-26 OHP 板的工作原理图

1. 公务开销信息的处理

采用电路交换的方式，处理语音和与语音处理有关的信令。在图 7-26 中，该部分功能由时分交换单元、会议电话处理单元、编码解码器(CODEC)、用户线接口电路(SLIC)、信号音生成单元、PCM 时钟单元、信令 HDLC 单元实现。

- (1) 具有选址呼叫、群址呼叫和广播呼叫 3 种呼叫方式。
- (2) 具有跨光复用段的通话能力，即进行不同的光复用段之间的公务联络。
- (3) 具有多方向公务互通功能，互通方向不少于 4 个。

- (4) 具有主、副话机接口。两话机均可延伸不小于 200 m 的距离，主、副话机具有相同的呼叫能力。
- (5) 接口为音频口，位于 OA 子架的接口区。

2. 透明用户通道信息的处理

完成监控通道中透明用户通道信息的处理，并提供 2 个用户透明通道接口（RS-232 接口和 RS-422 接口）。

3. 控制与通信信息的处理

通过图 7-26 中的控制与通信信息单元，接收各个模块的监控信息，上报网管。同时，也可接受网管对 OHP 板的控制命令。

7.17 160 波系统常见单板

不同厂家的设备主要是英文名称不同，但是常见的单板的功能都是完全相同的。有经验的维护工程师能够从简单的单板的英文缩写就可以猜想出该单板的主要功能。为了便于维护，本节把中兴、华为和烽火三个厂家 160 波系统中的常见单板中、英文名称整理如下（见表 7-4 至表 7-6），以方便采购和维护设备。

表 7-4 中兴 ZXWM M900 单板命名列表

单 板 类 型	单板英文名称	单板中文名称
监 控 类 单 板	NCP	主控板
	OSC	光监控通道板
	OHP	开销处理板
	NCPF	百兆主控板
	OSCF	百兆光监控通道板
	OHPF	百兆开销处理板
	APSF	百兆自动倒换板
	PBX	子架电源盒板
	PWSB	电源监控板
	FCB	风扇控制板
光转 发类 单板	OTU	光转发板
	OTUP	具有通道保护功能的光转发板
	OTUF	带 FEC 功能的光转发板
	OTU10G	10 Gb/s 光转发板
	OTUE10G	增强 FEC 功能的 10 Gb/s 光转发板
会聚类 单板	SRM42	4 路 622 M/155 M 子速率会聚板
	SRM41	4 路 2.5 G 子速率会聚板
	GEMF	带 FEC 功能的吉位以太网会聚板

单 板 类 型	单板英文名称	单板中文名称
合 分 波 类 单 板	OCI	光合分波交织板
	OBM	宽带复用板
	OMU	光合波板
	VMUX	预均衡合波板
	ODU	光分波板
	OAD	光分插复用板
	SDM	监控分插板
光放 大类 单板	OA	光放大板
	DRA	分布式 RAMAN 放大板
	HOBA	高饱和输出功率放大板
功率 管理 类单 板	VGSC	可调增益斜率补偿板
	DGE	动态增益均衡板
	LAC	线路衰减补偿板
	OWM	光波长监控板
	OPM	光性能检测板
保护 类单 板	OP	光保护板
	OMCP	光多通道保护板
	SWE	电交叉板
时钟类单板	CA	时钟分配板

表 7-5 华为 Optix BWS 1 600 Gb/s 系统单板命名列表

单 板 类 型	单板英文名称	单板中文名称
光 波 长 转 换 单 元	LWF	STM-64 标准 FEC 功能波长转换单元
	LWFS	STM-64 标准 FEC 功能波长转换单元（super WDM）
	LRF	STM-64 标准 FEC 功能再生中继波长转换单元
	LRFS	STM-64 标准 FEC 功能波长转换单元（super WDM）
	LWS	STM-64 增强型 FEC 功能波长转换单元
	LRS	STM-64 增强型 FEC 功能再生中继波长转换单元
	LWC	STM-16 收发合一光波长转换板
	LWC1	支持 G.709 建议 STM-16 收发合一光波长转换板
	TWC	STM-16 发端光波长转换板
	TRC	STM-16 FEC 功能再生中继光波长转换板
	TRC1	支持 G.709 建议 STM-16 FEC 功能再生中继光波长转换板
	TMX	四路 STM-16 与 OUT-2 异步复用板
	TMXS	四路 STM-16 与 OUT-2 异步复用板（super WDM）
	TMR	10.71G 超强 FEC 再生中继波长转换板
	OCU	四路 STM-16 光波长复用转换单元（FEC）
	OCUS	四路 STM-16 光波长复用转换单元（FEC&super WDM）
	LDG	双路 GE 接口板
	LWX	任意速率光转换板
	LWM	多速率光波长转换板
	LQS	4×STM-1/4 光波长复用转换板
	LGS	单路 GE 和单路 STM-1/4 会聚板

单 板 类 型	单板英文名称	单板中文名称
光波长 转换单元	LBE	10 GE 收发一体光波长转换板（LAN 接口）
	EC8	8 路 ESCON 业务会聚板
	AP4	4 路任意协议业务会聚板
光复用、解复用、 分插复用单元	M40	40 波合波单元
	V40	40 波光自动可调光衰减合波单元
	D40	40 波分波单元
	MB2	可扩展两波光分插复用板
	MR2	双路光分插复用板
	ITL	梳状滤波器单元
	FIU	光纤线路接口单元
光纤放大器单元	OAU	光放大单元
	OBU	光功率放大单元
	OPU	光前置放大单元
	WBA	多波长光功率放大单元
	WPA	多波长前置光放大单元
	HBA	高功率光功率放大单元
	RPC	C 波段 Raman 驱动单元
	RPL	L 波段 Raman 驱动单元
	RPA	C+L 波段 Raman 驱动单元
性能检测及 调节单元	MCA	多通道光谱分析单元
	VA4	4 路可调光衰减板
	VOA	可调光衰减板
	DGE	动态增益均衡板
	DSE	色散斜率均衡板
	GFU	增益平坦单元
光纤自动 监控单元	FMU	光纤监测单元板
	MWA	监测波长接入板
	MWF	监测波长滤波板
保护单元	OLP	光线路保护板
	OCP	光通道保护板
	SCS	同步光通信分离板
	PBU	电源备份板
光监控信道单元	SC1	单向光监控信道板
	SC2	双向光监控信道板
	TC1	单路光监控信道及时钟传送单元
	TC2	双路光监控信道及时钟传送单元
系统控制与 通信单元	SCC	系统控制与通信板
	SCE	扩展子架主控板

表 7-6 烽火 GDB/GZD/OAD9953-01-160 型 160×10 Gb/s 波分复用系统常见单板命名列表

单 板 类 型	单板英文名称	单板中文名称
监控类 单板	OSC	光监控信道板
	EMU	网元管理单元
	EOW	公务盘
	HUB	集线盘
	OPM	光性能监视盘
光转发类单板	2OTU	收发合一光转发盘
	OWA	光波道适配盘
	OWT	光波长转换盘
	2OWT	双发送光转发盘
	2GE	双通道吉位以太网接口盘
	RR	接收再生盘
	2REP	中继光转发盘
	FEC	前向纠错盘
	FTF	FEC 再生光转发盘
	FTS	收 FEC 再生光转发盘
	STF	发 FEC 再生光转发盘
	RFEC	前向纠错接收盘
	TFEC	前向纠错发送盘
会聚类单板	MIU	多速率同步接口盘
合分波类单板	OMU	光复用单元
	ODU	光解复用单元
	SAD	光监控信道分插板
	ITL	光交织滤波器
	OAD	光分插复用盘
光放大类单板	OPA	光前放盘
	OBA	光功放盘
	RAU	喇曼放大盘
功率管理类单板	OWP	光波道处理盘
保护类单板	OCP	光通道保护盘

第 8 章 WDM 系统网络管理

8.1 WDM 系统网管基本要求

WDM 网络管理系统主要由网元管理系统 (EM) 及辅助本地维护终端 (LCT) 组成。

WDM 系统应设置独立的网元管理系统, 独立于其所承载的 SDH 设备, 具有在一个平台上管理光放大器、波分复用器、波长转换器、监控信道性能的功能, 能够对设备进行性能、故障、配置及安全等方面的管理。

对于同一厂家, 既能提供 SDH 设备, 又能提供 WDM 系统时, 当 WDM 的网元和 SDH 的网元具有相同的北向接口时, 可以采用同一网元管理系统管理, 但其网管系统也可以分离, 必须具有承载其他厂家 SDH 系统的功能。

网管系统所涉及的管理接口主要包括网络管理层接口 (网元管理器北向接口)、工作站接口、本地终端接口 (LCT)。工作站接口应符合 f 接口的要求, 目前可采用 ITU-T 建议 V.10/V.11 或 V.28/V.24 的规定。本地终端接口应符合 f 接口要求, LCT 提供本地设备的维护能力, 管理能力应符合有关网元的管理功能。

8.2 网元管理系统主要功能

网元管理系统承担授权区域内各网络单元的管理, 被管理网络中的各网元均应由一个管理软件和硬件平台进行管理。在工作站的用户窗口界面上应能监视被管理的区域网络, 并能显示被管理的整个网络拓扑结构。网元管理系统应能监视和控制到整个被管理网络中的每一个网元, 告警和事件记录追踪至 WDM 系统的每一块电路板。

WDM 系统网元管理系统的主要功能包括故障管理、性能管理、配置管理和安全管理。

8.2.1 故障管理

故障管理能对传输系统进行故障诊断、故障定位、故障隔离、故障改正及路径测试功能。

1. 告警功能

网元管理系统应至少能支持下列告警功能:

- (1) 利用内部诊断程序识别所有故障并能将故障定位至单块插板;
- (2) 能报告所有告警信号及其记录的细节, 如时间、来源、属性及告警等级等;
- (3) 应具有可闻、可视告警指示;
- (4) 告警历史记录应便于查看和统计;
- (5) 具有告警过滤和遮蔽功能;
- (6) 能设置故障严重等级;
- (7) 激光器寿命预告警。

2. 监视告警参数

在 WDM 系统中，故障管理必须监视的告警参数如下：

1) 光发射单元（SDH 终端）

- (1) 激光器输出光功率值不足或过载；
- (2) 输入信号丢失（LOS）；
- (3) 发送器劣化；
- (4) 激光器发送失效；
- (5) 激光器寿命告警；
- (6) 调制器输出光功率告警（采用铌酸锂调制器时）。

2) OTU

- (1) 激光器输出光功率值不足或过载；
- (2) 输入信号丢失（LOS）；
- (3) 发送器劣化；
- (4) 激光器发送失效；
- (5) 激光器寿命告警；
- (6) 调制器输出光功率告警（采用铌酸锂调制器时）；
- (7) 光输入信号电平过高或过低。

3) 光放大器（EDFA）

- (1) 输入合路信号丢失；
- (2) 输入单波长丢失；
- (3) 泵浦激光器偏流过高；
- (4) 泵浦激光器温度过高；
- (5) 监测失效。

4) 接收单元 ODU

- (1) 输入合路波长信号丢失；
- (2) 单个波长丢失；
- (3) 分波器温度控制告警（对采用温度敏感的分波器件）。

5) 光监控通路

- (1) 激光器发送失效；
- (2) 光信号丢失；
- (3) 光信号帧丢失；
- (4) 光信号帧失步。

另外，监控告警参数还包括外部事件告警管理功能，如无人中继站的开门告警和火警告警等。

8.2.2 性能管理

1. 性能管理功能

故障管理中必须监视的基本参数也是性能管理必须监视的，此外，性能管理至少有

以下管理功能：

- (1) 能对监控信道 OSC 的误码性能参数进行自动采集和分析，并以 ASCII 码文件形式传给外部存储设备；
- (2) 能同时对所有终端点进行性能监视；
- (3) 能同时对性能监视门限进行设置（如泵浦源功率、激光器偏置电流）；
- (4) 能存储和报告监控通路 15 min 和 24 h 两类性能事件数据；
- (5) 能报告“当前”和“近期”两种性能监视数据。

2. 性能监视的参数

故障管理中必须监视的基本参数也是性能管理必须监视的参数，此外，性能管理还至少有以下管理功能：

1) 光发射单元（SDH 终端）

- (1) 激光器输出光中心波长值（可选项）；
- (2) 激光器输出光中心波长偏移值（可选项）；
- (3) 激光器输出光功率值；
- (4) 激光器波长控制对应的实测温度值；
- (5) 激光器偏置电流值；
- (6) 外调制器偏置电压值（如采用分离的外调制器时）。

2) OTU

- (1) 光输入信号电平；
- (2) OTU 输出功率；
- (3) 激光器输出光中心波长值（可选项）；
- (4) 激光器输出光中心波长偏移值（可选项）；
- (5) 激光器输出光功率值；
- (6) 激光器波长控制对应的实测温度值；
- (7) 激光器偏置电流值；
- (8) 外调制器偏置电压值（如采用分离的外调制器时）。

3) 光放大器（EDFA）

- (1) 总输入光功率；
- (2) 总输出光功率；
- (3) 每通路输出光功率；
- (4) 每通路输入光功率；
- (5) 泵浦激光器工作温度；
- (6) 泵浦激光器偏置电流。

4) 接收单元 ODU

- (1) 总输入光功率；
- (2) 单波长输入功率；
- (3) 分波器温度（对采用温度敏感的分波器件）。

5) 光监控通路

- (1) 激光器输出光功率;
- (2) 激光器工作温度;
- (3) 误码性能。

8.2.3 配置管理

设备管理系统应至少能提供以下配置管理功能:

- (1) 网元(包括各组成单元 NE)的初始化设置;
- (2) 建立和修改网络拓扑图;
- (3) 配置网元状态;
- (4) NE 的状态和控制;
- (5) 实际网络的配置能按用户请求以图形方式在网元管理系统屏幕上完成。

目前,点到点的 WDM 系统配置功能较少,随着 OTN 的使用,其配置功能会大大加强。

8.2.4 安全管理

安全管理应至少能提供以下管理功能:

- (1) 操作级别及权限划分;
- (2) 用户登录管理;
- (3) 日志管理;
- (4) 口令管理;
- (5) 管理区域划分;
- (6) 用户管理;
- (7) 操作记录;
- (8) 安全检查(如核查口令);
- (9) 安全告警;
- (10) 未经授权不能接入管理系统,具有有限授权的人只能接入相应授权的部分;
- (11) 应能对所有试图接入受限资源的申请进行监视和实施控制。

8.3 网元管理系统数据通道保护

当某段光缆中断,波分系统的监控(OSC)通道双向阻断时,网元管理系统将无法获取网元的监控信息,为防止这种情况带来的严重后果,WDM 系统必须具有监控通道保护功能。通过增加非该系统的外部路由,对网管系统监控通道进行保护。同时,网元管理系统数据库也必须具有相应的保护方案(如采用 DCN、专线 2M 信道保护等方式),保证不丢失数据库中的数据。目前,现网采用主、辅网管服务器的方式,异地服务器、数据同步进行保护。

第 9 章 WDM 系统的维护内容及指标优化控制

9.1 WDM 系统例行维护周期和维护项目

本节将具体介绍维护的相关内容。WDM 系统设备的例行维护项目如表 9-1 所示。

表 9-1 WDM 系统设备例行维护周期和维护项目

周 期	维 护 项 目
每日	检查机房电源
	检查机房环境：温度、湿度、清洁度等
	实时监视检查设备告警
每周	检查机柜声光告警功能
	检查风机盒并清洁防尘网
	检查公务电话并进行通话性能试验
每月	利用网管监测主光通道光收发功率
	监测光放大器收发光功率以及泵浦激光器的工作温度、偏置电流
	监测监控通道收发送光功率
	监测光复用段误码性能
每半年	在 MPI-S、MPI-R 点测试光通路信噪比
	测试光通路收、发光功率及频偏

1. 检查机房电源

检查机房设备供电电源是否正常，查看设备有无异常告警。用万用表测量输出电压是否在正常范围之内。目前传输设备使用直流电源电压均为-48 V，允许电压范围为-57.6~-38.4 V 之间。

2. 检查机房环境

1) 检查机房的温度、湿度

检查机房的温度、湿度是否符合设备运行的环境要求。首先在 WDM 网管上查询告警，有无温度异常告警。然后利用机房的温、湿度计查看温度和湿度，设备运行允许的湿度和湿度要求如表 9-2 所示。建议保持机房温度为 20℃左右，湿度为 60%左右。

表 9-2 WDM 设备温度和湿度要求

设备名称	温 度		相对湿度	
	长期运行	短期运行	长期运行	短期运行
光传输设备	0~40 ℃	-5~45 ℃	10 %~90 %	5 %~95 %

注：机房温、湿度，是指在地板上方 1.5 m 和产品前方 0.4 m 处所测量的数值。短期工作条件是指连续工作不超过 72 h 和每年累计不超过 15 天。

2) 检查机房清洁度

检查机房的清洁度是否符合设备运行的环境要求。机房内应无真菌、霉菌等微生物，机房内应无啮齿类动物（如老鼠等）的存在。检查机房环境是否达标，无爆炸、导电、导磁性及腐蚀性尘埃。设备的运行环境应符合如表 9-3 所示标准。

表 9-3 WDM 设备运行环境要求

物质类别	物质名称	含 量
机械活性物质	灰尘粒子	$\leq 3 \times 10^5$ 粒/立方米
	悬浮尘埃	≤ 0.4 mg/m ³
	可降尘埃	≤ 15 mg/（m ² ·h）
	沙砾	≤ 100 mg/m ³
化学活性物质	二氧化硫 SO ₂	≤ 0.20 mg/m ³
	硫化氢 H ₂ S	≤ 0.006 mg/m ³
	氨气 NH ₃	≤ 0.05 mg/m ³
	氯气 Cl ₂	≤ 0.01 mg/m ³
	盐酸 HCl	≤ 0.10 mg/m ³
	氢氟酸 HF	≤ 0.01 mg/m ³
	臭氧 O ₃	≤ 0.005 mg/m ³
	一氧化碳 CO	≤ 5.0 mg/m ³

3. 实时监视检查设备告警

通过查看机柜顶部的告警指示灯，观察设备是否有紧急告警和主要告警。各指示灯的说明参见表 9-4。若发现有红灯或黄灯亮，说明有紧急告警或主要告警。进一步查看单板指示灯，确定发生告警的单板及告警的类型，以便排除故障，消除告警。在设备正常工作时，柜顶指示灯应该仅绿灯亮。

表 9-4 WDM 设备机柜顶部指示灯说明

指示灯	名 称	状 态	
		亮	灭
红灯	紧急告警指示灯	设备当前有紧急告警，一般同时伴有声音告警	当前设备无紧急告警
黄灯	主要告警指示灯	设备当前有主要告警	当前设备无主要告警
绿灯	电源指示灯	设备当前供电电源正常	当前设备供电电源中断

4. 检查机柜声光告警功能

检查设备机柜声光告警功能是否正确设置，并检查声光告警功能是否正常。

- (1) 检查机柜顶部电源盒面板上的相关告警开关，正常情况应置于拨上状态。开关拨下，告警声消除。
- (2) 检查网管控制单板上的告警开关，正常情况应置于拨上状态。当有告警发生，并且告警确认后，开关拨下，告警声消除。
- (3) 如果告警外接到集中告警设备，检查集中告警设备上的开关及接线是否正常。

5. 检查风机盒并清洗防尘网

在网管上查看是否有风扇告警，无此告警说明风机盒工作正常。检查风扇运行是否正常，并及时清理防尘网，保证设备能否正常散热。清洗防尘网步骤为：

- (1) 拉防尘网的把手，抽出防尘网。在室外用水冲洗防尘网，然后用干抹布擦净，并在通风处吹干。
- (2) 清理工作完成后，滑入导槽将防尘网调整好位置轻轻地推入，将防尘网插回原位置。

6. 检查公务电话并进行通话性能试验

检查公务电话设置是否正确，在所在站点依次拨打其他站点的公务电话、拨打会议电话等，检查振铃、通话状态是否正常。公务电话不通时，先确认被叫方是否挂机。若已挂机，则由网管站通过网管检查相应的单板配置数据是否发生了改变。

7. 监测主光通道收发光功率

利用网管系统检查主光通道收发光功率，发光功率主要检查 OBAout 的光功率，接收功率主要检查 OPAin 的光功率，工程移交时是否调整为合适光功率值，进行正常运维后比对每月的变化值，可发现光缆线路是否存在故障隐患。

8. 监测光放大器

利用网管系统检查本维护区域内各站设备所使用的各类放大器的输入、输出光功率，可计算出该放大器的增益值，与实际配置的放大器增益比较，可判断该放大器是否正常。同时，利用网管可查出放大器中激光器的工作温度、偏置电流等，每月比对变化，可尽早发现放大器劣化的情况。

9. 监测监控通道收发光功率

利用网管系统每月监测监控通道的收发光功率，目的是检查监控通道的工作状态和光纤连接尾纤是否出现接触不良的问题。

10. 监测光复用段误码性能监测

利用网管可在线监测本维护区域内一个光复用段的误码性能，在相关台站设备光转换单板上设置检查各单波的误码性能。

若监测某单波误码性能不可用，则采用中断性误码性能测试。

测试方法如下：设置误码仪，按图 9-1 所示连接，进行误码测试。误码测试可以级联测试，图中虚线代表的可以是多个光波长转换板（包括对端站单板），也可以是合波板、分波板、放大板等共同组成的光路，进行 24 h 误码测试。通过网管分析波长转换单元 OTU 的性能参数 B1 的数值，进行故障定位，待排除故障后重新测试。

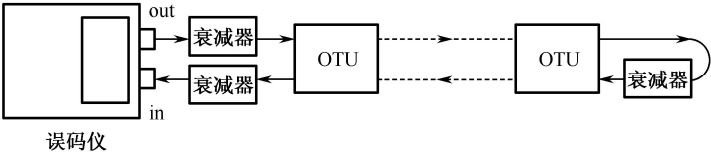


图 9-1 误码测试连接图

11. 在 MPI-S/MPI-R 点测试光通路信噪比

检查设备运行期间，OTM 站接收端的光信噪比是否发生劣化，影响设备正常运行。将 MPI-S/MPI-R 点的单板（通常在 OBA/OPA 板的监测口测试）与光谱分析仪按图 9-2 连接。将测试结果与标准（工程验收或巡检测试记录）比较，对异常数据进行分析。

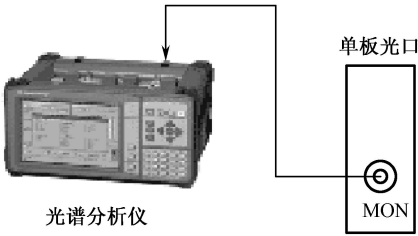


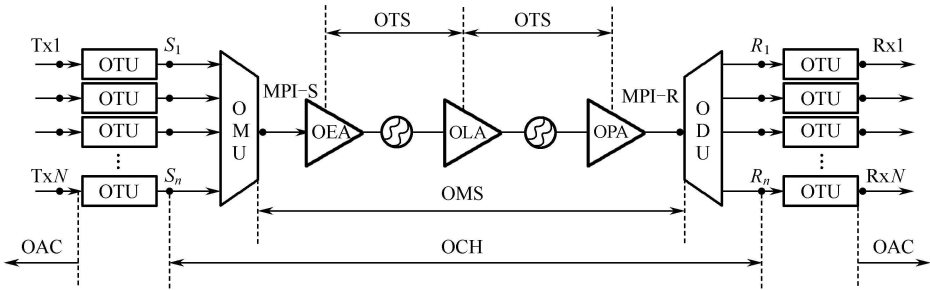
图 9-2 光谱分析仪测试示意图

12. 测试光通路收发光功率及频偏

按图 9-2 所示的连接测试方法，测试信噪比的同时，可测试出 WDM 系统各波的收发光功率参考值和频偏值。测试各波收发光功率重点是检查光通道的平坦度，各波之间最大与最小光功率差应符合指标要求，测试频偏值主要是检查波长转换板工作频率是否正常，若频偏会导致光功率、光信噪比不合格，则需要更换机盘。

9.2 WDM 系统的光功率调整及主要指标控制

光功率调整是波分复用系统指标控制的主要部分，涉及光信号传递的各要素和环节，保证光放大器工作在最佳状态对系统稳定运行和今后扩容升级都是非常重要的。光波分复用系统图如图 9-3 所示，本节重点介绍各节点光功率值的计算方法和光功率调整措施，是系统主要指标控制的重要内容。



OCH—光通道层：衡量单波信号在系统中的传输；OMS—光复用段层：衡量合波信号的特性；OTS—光传送层：信号在光缆中传输的特性；OAC—光接入层：接入各种客户的特性

图 9-3 光波分复用系统图

在进行光功率调试之前通常要做好以下的准备工作：单板输出光功率的检查；站内光纤的检查；网管监控；OMU 和 ODU 的插损测试。然后对系统收发 OTU，OMU，ODU 和光放大器的各点光功率按照计算标准指标进行逐一调测。主要目的是将合波信号中各单波光功率调整均衡，否则级联放大后，增益功率将只集中在某几个单波上，造成个别

波功率超过过载点，个别波可能没有达到灵敏度要求。

光功率调整的步骤是首先沿着信号传输的方向进行调试；调完一个方向再反向调通另一个方向。

1. OMU 的插损测试

OMU 单板是 WDM 系统中的无源单板，影响 OMU 板的主要性能是 OMU 单板的插损。

测试时应首先在 S_1 点测试接入的单波光功率；在 OMU 的 OUT 口测试输出的单波光功率；将两个测得的数值相减，差值即为这一波在 OMU 的插损值；多个通道，随机抽测几个通道。允许通道差值小于标准值（不同的设备波通道数，指标不同，可查维护技术标准），一般在 6~10 dB，常用的 OMU 的插损测试图如图 9-4 所示。

2. ODU 的插损测试

ODU 和 OMU 一样，属于无源单板，插损的测试方法和 OMU 基本相同，不过 ODU 是用在收端的，常用的 ODU 的插损测试图如图 9-5 所示。

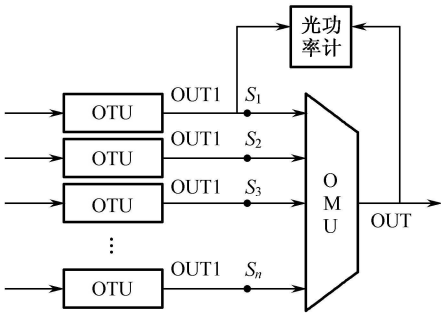


图 9-4 OMU 的插损测试图

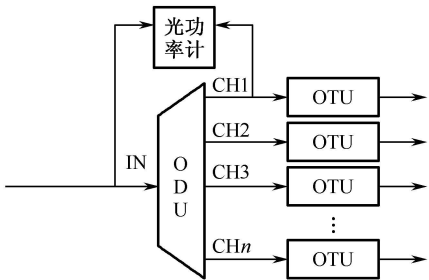


图 9-5 ODU 的插损测试图

3. 发端 OTU 调试

发端 OTU 调试图如图 9-6 所示，在发端 OTU 的 IN 口用于用户侧信号的接入以及线路侧单波信号的发送。发端 OTU 的输入部分完成客户信号的光电转换功能，使用的主要器件是光电转换器。

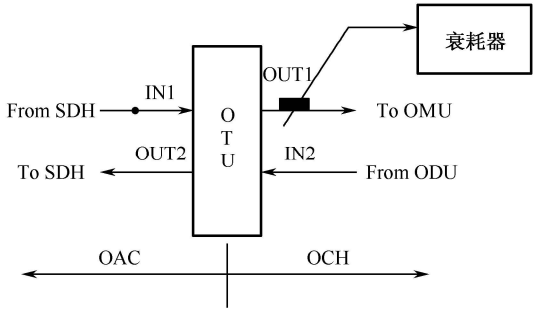


图 9-6 发端 OTU 调试图

发端 OTU 由于用户侧距离较短，常用的光电转换器是 PIN 管，PIN 管的工作范围如表 9-5 所示。

表 9-5 PIN 管的工作范围

速率/G	接收灵敏度/dBm	过载点/dBm	最佳值/dBm
2.5	-18	0	-8
10	-14	0	-7

发端 OTU 的输出部分完成波分信号的电光转换功能，使用的主要器件是半导体激光器，通常采用电吸收激光器；不同的激光器输出光功率会有一定的差异，各单波之间功率的差值通常被称为通道功率差；最大一波和最小一波的差值我们称为最大通道功率差。在发端 OTU 的输出口调试时必须控制最大通道功率差，一般调整要小于 3 dB。通常发端 OTU 输出光功率在-3 dBm 左右（指标为-5~0 dB），一般以-3 dBm 为参考点调试 OTU 的输出光功率，可容忍的输出功率范围在-3 dBm±1.5 dB 之内。高出上限的可在 OTU 的输出口加光衰减器，低于下限的必须更换单板。可利用光谱分析仪在 OBA 板的监测口测试，保证各波输出光功率的平坦。

4. OMU 的调试

OMU 的功能主要是将各个 OTU 输出的单波信号进行合波。为了下一步的调试，需要对 OMU 的合波信号进行测试。

预算光功率：合波器输出光功率=单波输入光功率+10lgN-插损

计算中，一般假设每个通道的单波光功率相同，取-3 dBm；OMU 的插入衰减取-7 dBm；N 为开通的波道数，参见图 9-4。

例如，开通 3 波时 OMU 输出值为 $P_{合3}=P_{单}+10lg3-插损=-3+5-7=-5\text{ dBm}$

5. OBA 调试

光放大器 OA 具有三个工作状态：过饱和输出、饱和输出、欠饱和输出。

OBA 调试，目的是使 OA 工作在最佳工作状态。计算 OBA 输入的最佳光功率值一般有三个步骤：计算单波光功率；计算现有波数的合波光功率；根据增益计算输入。

假设输入的合波信号中各个单波信号的功率均衡，则有：

合波器输出光功率=单波输入光功率+10lgN

OBA 调试光功率图如图 9-7 所示，在 40 波系统中当前使用了 3 波，光放大板参数为 22/20（22 为放大器增益，20 为输出饱和光功率），计算 OBA 输入的最佳光功率值 OBA 输入的最佳光功率值。

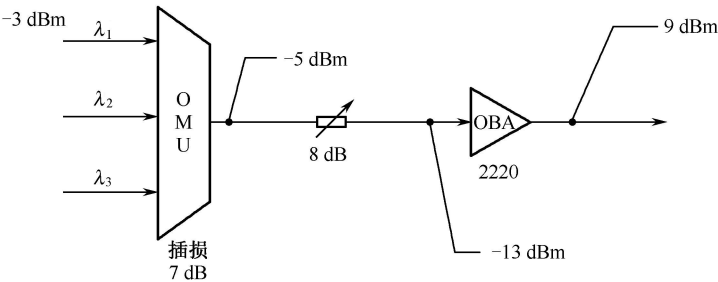


图 9-7 OBA 调试光功率图

1) 计算单波光功率

$$P_{\text{合}40}=P_{\text{单}}+10\lg40, P_{\text{合}40}=20\text{ dBm}$$
$$P_{\text{单}}=P_{\text{合}40}-10\lg40=20\text{ dBm}-16\text{ dB}=4\text{ dBm}$$

2) 计算现有波数的合波光功率

$$P_{\text{合}3}=P_{\text{单}}+10\lg3=4\text{ dBm}+5\text{ dB}=9\text{ dBm}$$

即 3 波输出时，最大饱和输出光功率为 9 dBm

3) 放大板输入光功率

$$P_{\text{in}}=9\text{ dBm}-22\text{ dB}=-13\text{ dBm}$$

为使 OBA 工作在最佳工作状态，OBA 输入口需加 8 dB 的衰耗器，将-5 dBm 调整到-13 dBm。

6. OPA 调试

对于光放大板的光功率计算，OBA，OPA 和 OLA 的思路和方法都是相同的，都是通过控制 OA 的输入光功率使 OA 的输出处于饱和状态，从而实现线路的光功率控制的。

7. ODU 调试

ODU 的功能主要是将合波信号中的各个光载波拆分出来输出到对应的 OTU，即进行分波。可以在 ODU 的各通道口测得各单波的光功率，正常值应符合下面的计算公式，即
合波输入光功率-10lgN-插损=单波输出光功率

8. 收端 OTU 调试

收端 OTU 调试图如图 9-8 所示，收端 OTU 用于线路侧单波信号的接入以及客户侧业务信号的发送，收端 OTU 的输入部分用于线路信号的光电转换，主要的器件是光电转换器。

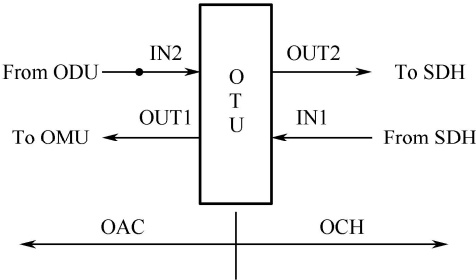


图 9-8 收端 OTU 调试图

常用的光电转换器是 APD 管，APD 管的工作范围如表 9-6 所示。

表 9-6 APD 管的工作范围

速率/G	接收灵敏度/dBm	过载点/dBm	最佳值/dBm
2.5	-28	-9	-14
10	-21	-9	-12

APD 的接收灵敏度优于 PIN 管，但是过载点却低于 PIN 管；如果接收时光功率高于过载点，有可能击穿器件，造成业务中断。

由于经由 ODU 分波出来的各单波光功率基本一致，所以通常是把各波所需的光衰减统一加在 ODU 的输入口，OTU 光功率调整如图 9-9 所示。

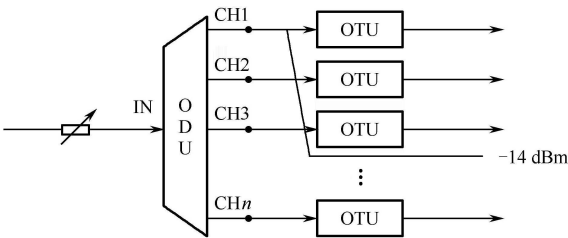


图 9-9 OTU 光功率调整

9.3 WDM 系统指标优化

WDM 系统运行一段时间后，都会不同程度地出现系统性能下降或劣化，呈现在用户通信上就是系统误码。影响系统性能下降的因素很多，按照分类可分为线路光纤的问题和传输设备本身的问题。目前来自线路光纤的问题主要是外界因素造成光缆阻断后增加光缆接续的接头，造成再生中继的衰耗增加；来自传输设备的问题主要体现在发送光功率下降，个别单板不稳定等。介于这些来自客观因素的影响，就需要维护人员在一定的时段内进行必要的系统性能调整，对主要指标进行优化，预防和处理可能出现的系统隐患，保证系统在可控范围内稳定运行。衡量运行中的光波分复用系统的主要指标有：光再生段双纤衰耗平衡度、光放大器工作状态、主光通道光功率、光波长平坦度和光信噪比等。本节针对运行状态中的光波分复用系统，提出以上主要指标的优化方法，提供取舍最佳指标数值的计算方法和依据。

优化 WDM 系统的参考模型如图 9-10 所示。

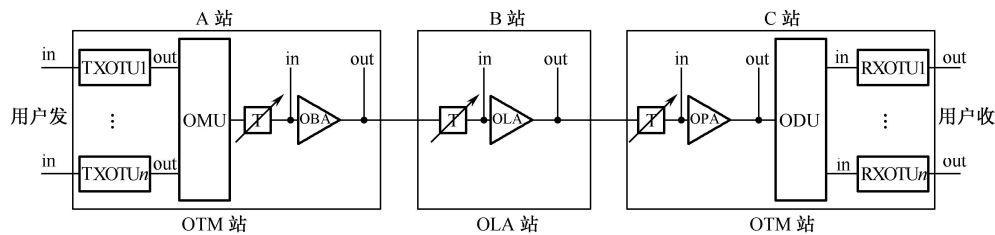


图 9-10 优化 WDM 系统的参考模型

对于运行中的 WDM 系统指标优化过程，要充分利用网管系统，读取现有相关数据，比对历史数据，判断和分析指标变化状况，做出调整和优化方案。需要注意的是通常从网管读取的 OBAout 至 OPAin 光功率值，包括了光缆线路、尾纤、法兰盘及放大器输入端的衰耗器；在调整主光通道放大器增益时，衰耗器应加在放大器的输入侧（in 口），不应加在放大器的输出侧（out 口）；这样可使放大器工作在最佳状态，同时，安装位置统一，也便于今后维护与故障分析。

1. 光再生段双纤衰耗平衡度

检查光再生段双纤衰耗平衡度是系统优化的第一步，是判断运行中的波分系统能否稳定运行的基本条件。保证波分系统的稳定运行，首先要确保线路衰耗正常，并保证主光通道的光功率处于正常值范围内。如何利用网管数据判断线路衰耗情况，现以图 9-10 所示系统为例说明单向线路光纤衰耗的计算方法。

(1) 利用网管查出 A 站 OBA 的输出光功率、B 站 OLA 输入光功率值，同时注意检查设备输出和输入两端衰耗器的配置情况。

例如，A 站 OBA 的 P_{out} 为 12 dBm，B 站 OLA 的 P_{in} 为 -21 dBm，查出输入侧加了 10 dB 衰耗器，那么，A、B 之间的线路衰耗为 $12 - (-21) - 10 = 23$ dB。同样方法查 B 站的输出，C 站的输入及衰耗，可计算 B、C 站单向线路衰耗。反向线路光纤衰耗的计算方法同上。

(2) 计算出双向线路衰耗后，可对比各段线路双向衰耗是否一致。正常情况下双向光纤衰耗偏差一般不应超过 3 dB，如某方向单纤比另一方向单纤衰耗值大 5 dB 以上，说明该段线路存在故障隐患，可利用巡检或集中请示停机时间用光功率计、OTDR 判断，通过清洁、重接或更换、代通等方法解决。一般 90% 原因多为活动连接头脏、接触不良、尾纤衰耗大、法兰不好、光放盘内法兰接头脏引起，个别也有线路终端接头衰耗大或该段光缆线路总衰耗大等问题。

2. 光放大器工作状态及主光通道光功率

衡量光放大器性能的主要指标有：放大增益和饱和输出。放大增益表示放大量，饱和输出是指系统按照最大可开通波数开通时输出的最大光功率值。这两个指标，可以通过网管查出或在设备标签中查出。查出这两个指标对维护人员排除故障和优化系统是非常必要的。一般该设备指标的表示方式为：增益/饱和输出，如 OBA25/17，OPA27/11，OPA14/13，OLA33/17，OLA25/17 等。

1) 判断放大器是否正常

可通过网管读出放大器输入/输出功率后，计算放大器增益值（输出值减去输入值），看是否为放大器配置的增益倍数，若与放大器增益量偏差较大，说明该放大器可能已经性能劣化，需要更换了。

2) 主光通道光功率调整值是否在合适范围

系统在验收时或经过一段时间的运行后会发现，系统虽然只开通了几个波，但有些厂家为了保证收端各波光信噪比合格，把光功率放大器 OBA 的输出调得接近饱和输出值，没有给今后扩容波道留出足够的功率富余度。如何判断光功率值输出是否合适，如何计算出在开通波道数一定的情况下主光通道的光功率值，参见 9.2 节 OBA 调试内容。一般在 OBA 输出功率调整时，偏差为计算值的 ± 2 dB，调整时大部分为正偏差。

OPA，OLA 的算法与 OBA 相同。一般要保证光放大器输出尽可能合适，但前提是保证收端光信噪比合格。在实际系统中，只有 OTM 的 OBA 输出功率值提高对光复用段的光信噪比有影响，因此，不应盲目提高其他站型的光放大器输出，除非线路衰耗已不满足最小光功率值的要求。

3) 光放大器最大光功率和最小光功率极限值的计算

以下为中兴公司提供的经验公式，介绍一下光放大器最大光功率值和最小光功率值

的计算方法，其他公司的设备也可参考下式：

$$P_{\min}=P_{\text{饱和输出}}-P_{\text{放大器增益}}-10\lg N-6\text{ dB}$$
$$P_{\max}=P_{\text{饱和输出}}-P_{\text{放大器增益}}+3\text{ dB}$$

例如，对 16 波系统 OPA 为 27/11，其 $P_{\min}=11-27-12-6=-34\text{ dB}$ ， $P_{\max}=11-27+3=-13\text{ dB}$ ，输入范围为 $-34\sim-13\text{ dB}$ ；

OPA 为 16/11，其 $P_{\min}=11-16-12-6=-23\text{ dB}$ ， $P_{\max}=11-16+3=-2\text{ dB}$ ，输入范围为 $-23\sim-2\text{ dB}$ 。

这个范围是最大、最小的极限值，也就是说，线路距离在最长或距离过短时调整的光功率绝不能超过这个范围。

在调整或处理此类问题时，还要关注以下几方面的问题：（1）首先要保证线路衰耗值在正常指标范围内；（2）注意检查厂家配置的光放大器是否合理，有些距离很长，配置的放大器增益不够；（3）看线路距离是否过长，超出光放大器增益范围，是否需要增加台站或优化复用段等。

3. 各光波长光功率平坦度

保证各光波长光功率平坦度也是光波分系统的重要指标。通过测试各单波收、发波长转换板（RXOTU/TXOTU）的输入/输出光功率，检查单波光功率范围是否调整到指标允许的范围内，通常各波功率偏差值应在 3 dB 以内。

以图 9-10 参考模型为例，TXOTU 的 in 口和 RXOTU 的 out 口分别接的是用户业务侧，板型配置一般分长距（APD 管）和短距（PIN 管）两种，一般 APD 管光功率的范围为 $-25\sim-9\text{ dB}$ ，PIN 管光功率的范围为 $-18\sim 0\text{ dB}$ ，调整时尽量将光功率调整到中间值。TXOTU 的 out 口和 RXOTU 的 in 口分别接波分 ODU，ODU 侧，一般为出厂值或工程值，运行中一般不进行调整。

在光波长平坦度调整中，若个别波功率偏大，可适当在 TXOTU 板输出增加小数值的衰耗器来调平发送光功率，但要注意保证收端信噪比合格，且勿按照输出最低光功率进行调整。方法可参见 9.2 节发端 ODU 调试。

TXOTU 的 out 口参考值为 $-5\sim 0\text{ dB}$ ；RXOTU 的 in 口参考值为 $-2\sim +3\text{ dB}$ 。

利用光谱分析仪可在 OBA，OPA 的监测口测试各波长光功率参考值，比较各波长之间光功率差，检查各波的平坦度。

4. 光信噪比

光信噪比是衡量波分系统的重要指标，系统是否产生误码，关键看各波在每个光复用段接收侧的信噪比是否合格，可以说是“一票否决”的指标。通常是通过光谱分析仪在 OBA、OPA 监测口进行测试。测试时要注重各站 OTU 的配置，是否带 FEC，带 FEC 的指标比不带 FEC 的放宽 $5\sim 6\text{ dB}$ ，一般不带 FEC 的大于 20 dB ，带 FEC 的大于 16 dB 。在优化中的指标要给测试信噪比值留有富余度，一般至少要比指标值高 $2\sim 3\text{ dB}$ 以上。

检查一个光复用段光信噪比不合格时，首先要测试该复用段发端信噪比，调整提高 OTM 站发端光功率，保证发端信噪比合格，一般复用段距离较短的，光信噪比大于 33 dB ，复用段距离较长的，光信噪比大于 36 dB 为较佳；再保证各再生段光功率、线路衰耗在正常范围，一般该复用段在接收端测试信噪比都能合格。

第 10 章 WDM 系统常见故障分析及处理

随着光放大技术和色散问题的解决，WDM 设备在国内光缆干线传送网中得到了大量应用。在工程阶段，经过技术人员的精心安装和调试，都能正常稳定地运行。但设备在长期运行中，可能受到多种因素的影响，比如受系统外部环境的影响，部分元器件的老化、损坏、维护过程中的误操作，光缆线路的衰耗的变化等，都可能导致设备进入不正常的工作状态。维护人员只有对系统状态进行正确分析和诊断，对系统故障进行正确定位和处理，才能使故障迅速恢复，系统正常运行。

10.1 WDM 系统的故障特点

WDM 系统的故障特点如下：

- (1) WDM 系统（特别是基于 10 Gb/s 速率的 WDM 系统）对光缆线路的质量要求比较高，操作的不规范很容易造成系统性能下降；
- (2) WDM 系统所承载的业务颗粒比较大，故障影响面大；
- (3) WDM 系统故障无论是设备故障还是线路故障基本上都表现在光路上；
- (4) WDM 系统本身的系统结构和配置并不复杂，但它对性能指标要求相当严格，而且 WDM 系统的性能指标与实际使用的波道数有关，与光缆线路的距离、性能质量有关，需要及时更新和调整；
- (5) 成熟运用的 WDM 系统仍然以链状应用为主，其本身尚不具备网络自愈功能。

10.2 WDM 系统主要故障类型

WDM 系统的故障与其承载的 SDH 设备息息相关，许多故障都是首先通过 SDH 系统发现的。为了便于理解 WDM 故障，把 WDM 故障归类如下。

1) 按故障现象分类

按故障现象可分为：

- (1) 业务中断告警；
- (2) WDM 系统误码；
- (3) 业务瞬断；
- (4) 网管及通信故障；
- (5) 系统工作不稳定。

2) 按故障源区分类

按故障源区基本可分为以下几类：

- (1) 配套设备故障（光缆、尾纤、法兰盘、衰耗器等）；
- (2) 设备硬件故障；

- (3) 设备软件故障（软件进程问题）；
- (4) 电源故障（掉电、接地、电压不稳等）；
- (5) 割接故障（接头质量问题、距离变化引起色散补偿变化、用错光纤/缆带通等）；
- (6) 网管故障（计算机软件、硬件引起）；
- (7) 人为误操作故障（错误网管指令、损伤尾纤等）；
- (8) 设备工作环境问题（温度、湿度、鼠害、电磁干扰等）。

10.3 WDM 系统故障处理流程

WDM 系统故障处理流程如图 10-1 所示。

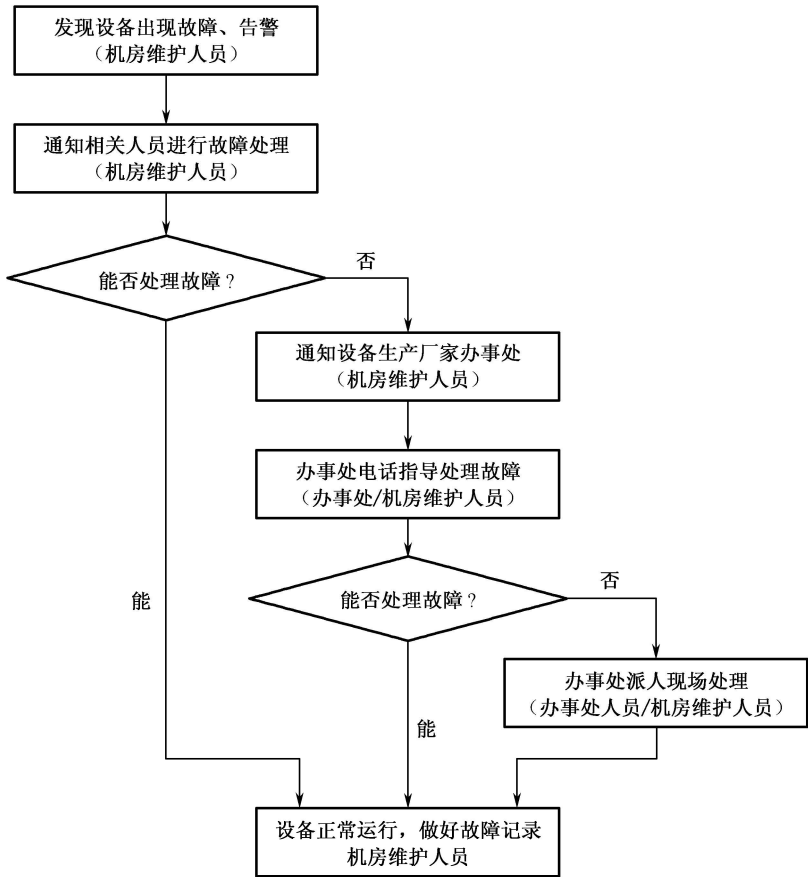


图 10-1 故障处理流程图

10.4 WDM 系统故障的常用处理方法

对于一般性的硬件故障通常采用：分析法、环回法和换板法。当故障发生时首先通过对告警事件、性能数据和信号流向进行分析，初步判断故障范围，然后通过逐段测量光功率和分析光谱排除尾纤或光缆故障，将故障定位到单板或光纤，最后通过换板或换纤排除故障。

1. 告警性能数据分析法

当 WDM 系统发生故障时，一般会伴随大量的告警事件和异常、性能数据的产生，通过对这些信息的分析，可近似判断出所发生故障的类型和位置。使用告警性能数据分析法最关键的问题就是如何全面真实地获取故障信息，故障信息的来源一般有两个渠道。

1) 通过网管查询故障信息进行故障定位

通过网管查询传输系统当前或历史的告警事件和性能数据，来获取故障信息进行故障定位，其特点是能够全面获取全网设备的故障信息，能够准确获取设备当前存在哪些告警、告警发生时间以及设备的历史告警，能够获取设备性能事件的具体数值。缺点是如果告警性能事件太多可能会面临无从着手分析的困难。同时完全依赖于计算机、软件、通信三者的正常工作，一旦其中之一出问题，通过该途径获取故障信息的能力将大大降低甚至完全丧失。

2) 通过观察设备机柜和单板告警灯进行故障定位

通过设备上的指示灯来获取告警信息，WDM 系统设计上就有不同颜色的运行和告警指示灯，这些指示灯的亮灭及闪烁情况，能够反映出设备当前的运行状况或存在的告警情况。通过这些单板指示灯的闪烁情况，可以大致定位故障的类型和位置。但是，设备和单板指示灯所能表示的故障信息是比较有限的，因此仅仅通过观察设备单板指示灯的明亮和闪烁情况进行故障的分析和定位，其难度相对较大。

由上面的介绍可以看出，通过网管与通过观察设备指示灯这两个途径获取设备故障信息各有优点。因此，在实际的故障定位过程中这两种手段要结合起来使用，排除故障时需要网管维护人员与各站的设备维护人员共同参与，一般应由网管维护人员协调指导各站的设备维护人员，密切配合统一行动。

2. 仪表测试法

1) 光谱分析测试

用光谱分析仪测试单板的 MON 口，输出信号的光谱直接从仪表上读出光功率、信噪比，将得到的数据和原始数据比较，是否出现比较大的性能劣化。

OMU 板、ODU 板、OBA 板、OPA 板的 MON 口均可以在线测试主信道光谱。如果受到影响的业务是主光通道的所有业务，可以重点分析 OBA 板和 OPA 板的光谱；如果受损的业务只是主光通道中的某一波的业务时，重点分析 OMU 板和 ODU 板的光谱。

2) 光功率测试

虽然从网管上的性能数据中可以得出各点的光功率，但是为了得到精确的值，用光功率计再次测量该点光功率也是非常必要的。需要注意的是当 OMU 的输出光功率、ODU 的输入光功率、OBA 或 OPA 的输入和输出光功率异常时，如果断开线路进行测试将会中断所有业务，所以，除了紧急情况，一般不可以随意测试主光通道信号的光功率。

3. 拔插法

发现某种单板故障时，可以通过插拔单板和外部接口插头的方法，排除因接触不良或处理机异常的故障。在插拔过程中，应严格遵循单板插拔的操作规范。插拔单板时，

若不按规范执行，还可能导致板件损坏等其他问题的发生。

4. 替换法

当用拔插法不能解决故障时，可以考虑替换法。替换法就是使用一个工作正常的物件去替换一个被怀疑工作不正常的物件，从而达到定位故障、排除故障的目的。这里的物件，可以是一段线缆、一个设备或一块单板。

替换法适用于排除外部设备的问题，如光纤、接入 SDH 设备、供电设备等，或故障定位到单站后，用于排除单站内单板的问题。如某站光板有告警，怀疑收发光纤接反，则可将收、发两根光纤互换。若互换后，光板告警消失，就说明确实光纤接反。替换法的优势在于简单，对维护人员要求不高，是比较实用的方法。但该方法对备件、尾纤及配套器材有要求。

5. 环回法

环回法是故障定位中最常用、最直接的方法。它不依赖于对大量告警和性能数据的深入分析。作为设备维护人员，应该熟练掌握它。

环回法适合于已知故障的范围，将故障范围分成两段，分别进行排除。它排除的故障可以是板件故障、线路故障。举例说明如图 10-2 所示。

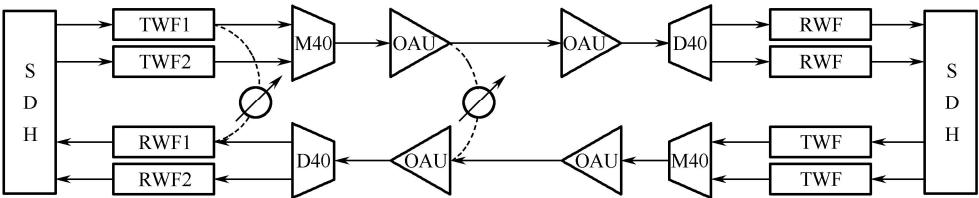


图 10-2 环回法故障排除示意图

图 10-2 中,RWF1 上报 R_LOF 告警,TWF1 无任何告警和误码数据。将 TWF1 和 RWF1 之间加固定光衰减器进行环回,可以判断接收端 OTU 是否故障。将接收端和发送端的 OAU 加可调光衰减器进行环回,可以判断光放大板是否有故障。

环回法对故障的处理非常有效、直接。但环回法要中断业务信号,同时,要加合适的光衰减器,保证环回点的光功率在正常范围。它一般应用在开局调测时的定位故障,对已经运行的系统,该操作需要中断业务处理。

6. 经验处理法

在一些特殊的情况下,如由于瞬间供电异常,低压或外部强烈的电磁干扰,致使设备某些单板进入异常工作状态。此时的故障现象,如业务中断、ECC 通信中断等,可能伴随相应的告警,也可能没有任何告警,检查各单板的配置数据可能也是完全正常的。经验证明,在这种情况下,通过复位单板,网元掉电重启。重新下发配置或将业务倒换到备用通道等手段,可有效地及时排除故障、恢复业务。

建议尽量少使用该方法来处理,因为该方法不利于故障原因的彻底查清。遇到这种情况,除非情况紧急,一般还是应尽量使用前面介绍的几种方法,或通过正确渠道请求技术支持,尽可能地将故障定位出来,以消除设备内、外的隐患。

10.5 WDM 系统故障的一般处理原则

WDM 系统故障定位原则可总结为：先外部因素，后波分系统；先定位单站，后定位单板；先主光通道，后个别波道；先高级告警，后低级告警。即，首先排除波分系统外部设备的问题，然后将故障定位到单站，接着定位单板问题，最终将故障排除。

1. 先外部因素，后波分系统

目前的波分系统故障中，非波分系统本身的外部故障占到总故障的 50%以上，因此在定位故障时，应尽可能先排除外部的可能因素，如光缆/尾纤问题、SDH 系统故障、电源和接地等问题。

1) 区分接入波分系统的 SDH 设备或数据业务本身问题

方法 1：通过查看网管告警（包括历史告警）和设备机盘判断告警产生来源，如通过查看 OTU 盘 B1 告警；

方法 2：环回法，用逐段做环的方法判断故障区间或故障源；

方法 3：替换法，互换波道观察告警是否转移。

2) 判断是否为线路或配套设备（法兰盘、尾纤、衰耗器等）故障

方法 1：通过查看网管告警；

方法 2：比较法，观察光缆割接前后的衰耗变化或观察与故障相同区间其他系统的告警情况；

方法 3：替换法，用指标合格的线路或配套设备替代观察告警的变化情况（特别适用于线路单方向故障）；

方法 4：仪表测试，采用 OTDR 或光功率计测试。

3) 电源问题或接地问题

方法 1：查看网管历史告警和当前告警变化情况，特别是两端的局站线路方向有 LOS 告警、某一站点登录不上、某站点电路盘频繁损坏、异常工作状态的情况；

方法 2：观察工作电源和地线的引接情况，确保所有设备可靠接地；

方法 3：使用仪表（如地阻仪、万用表）测试，确保接地电阻值和工作地、保护地之间的电压差在允许的范围内。

4) 其他问题

一些常规故障排除方法无法解决的异常问题，也应考虑到是来源于电磁干扰，机房的温、湿度等问题。

2. 先定位单站，后定位单板

故障定位中最关键的一步，就是将故障尽可能迅速准确地定位到单站。一般来说，综合使用以下三种方法，基本都可以将故障定位到单站。

方法 1：环回法，即通过逐站的 OTU 线路侧或 SDH 设备侧环回，定位出可能存在故障的站点、光放板或 OTU；

方法 2：性能分析法，即通过查看网管的告警性能数据，这种方法在处理误码和瞬断

等告警时比较实用；

方法 3：仪表测试法，通过光谱分析仪对波分系统不同性能监测点的信噪比、频率精度的测量，定位设备故障位置。

故障定位到单站后，进一步定位故障位置最常用的方法有：

方法 1：替换法，通过单板替换可定位出存在问题的单板。

方法 2：经验处理法，根据长期故障处理总结出各种故障的最常发故障点，在出现故障时优先考虑。比如说在设备故障板中以光器件的性能劣化导致单板损坏的情况居多，所以合、分波器一般不会产生故障，而以光放盘、OTU 盘故障为主。

3. 先主光通道，后个别波道

波分系统故障分为主光通道告警、个别波道告警、非业务性告警等几类，主光通道告警的故障常常会引起全部在用波长业务的异常告警，对系统影响比较大，应优先处理，一般和线路衰耗、光放盘等有关。

4. 先高级告警，后低级告警

在分析告警时，应首先分析告警级别高的告警，如紧急告警、主要告警；然后分析低级别的告警，如次要告警和一般告警，迅速将相互关联的告警进行分类处理。

以上判断原则并不是故障排除的先后顺序，而是判断故障的一般原则。在故障处理时，若要提高速度，平时的经验积累非常关键。

10.6 业务中断故障分析及处理

发生通信故障时，按图 10-3 所示的故障处理流程执行。

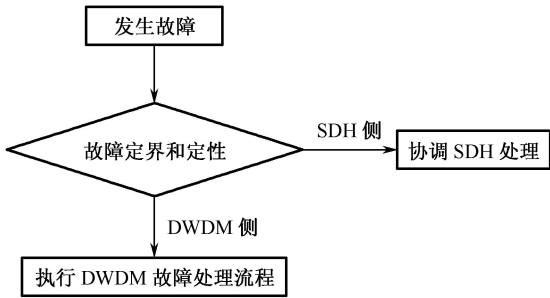


图 10-3 通信故障处理流程

当通道完全中断或通道中有误码故障发生时，首先必须启动备用通道代通，保证现有通信业务的正常进行。同时须及时定位主用通道的故障点。定位故障点必须将连接界面打断，分清是否是 SDH 的问题（如果是经过多级维护单位的传输，还必须和其他维护单位协调配合逐级定位故障点）还是 ODF 架的问题。

启动备用通道后，首先应在 SDH 和 WDM 设备连接的 ODF 架上通过光环回的方式准确定界和定性故障：确定究竟是 SDH 侧故障还 WDM 侧故障。

造成 WDM 系统的通信业务中断原因有很多，误码、线路阻断、光功率下降、设备对接等故障都会造成业务运行中断的重大事故。

如果只是某一路或几路信号业务中断，可以判断是波长转换板出现问题。如果是合路信号中断，则可能是线路上的单板，如合波分波板或光放大板出现问题。另外，如果业务的中断在时间上有规律性，应首先分析故障发生时的运行环境条件，如可能由于外部干扰温度异常造成了业务中断等。业务中断一般与误码设备对接故障有关，可以通过自环法定位故障，分离出是外部故障还是内部故障。

10.6.1 外部原因故障的定位与排除

外部故障类别及原因如表 10-1 所示。

表 10-1 外部故障类别及原因

故障类别	故障原因
光功率异常	光纤中断或熔接错误导致业务不通； 光缆衰减扩大
接入设备异常	接入设备故障导致业务不通
电源故障	外部电源供电中断、电源波动较大； 电源设备熔断器损坏造成传输设备输入电压异常； 电源线接头松动或腐化
环境异常	设备环境温度、湿度异常

1. 光纤接头异常

首先检查光纤是否断纤，接头是否异常。使用光功率计测量收光功率，如果无光输入说明光纤有断纤；如果有光输入，核对接收光功率值与工程安装时的记录值，若光功率值偏低，可能接头有问题，使用专用清洁材料清洁尾纤接口并拧紧，重复几次至光功率值正常。在操作过程中要注意光纤弯曲度半径应在大于 40 mm 的允许范围内。

2. 电源故障

1) 测量供电电压是否异常

断开电源盒上的电源总开关，测量电源盒电源接线端子处的电压。WDM 设备的供电电压范围为直流-57.6~-38.4 V。

打开电源总开关，关闭子架开关测量电源盒电源，如果两次测量的接线端子电压都正常，可判断为传输设备的电源盒故障或供电设备的负载能力差。

2) 排除电源盒的故障

如果故障定位到电源盒，可拆除电源盒上的电源接线后进行测量。接线处的输入电阻正常情况下是无穷大。然后闭合电源总开关，此时的电阻应是一点几万欧姆，如电阻值不正常则说明电源盒有问题，否则可确定是供电电源或线路问题。

3) 排除外部供电电源故障

定位到外部故障时需要电源工程师协助处理。

3. 环境异常

如果业务中断在时间上有规律性，应首先分析故障发生时的运行环境条件。如果由

于外部干扰、温度异常等造成了业务中断，应排除环境异常造成业务中断的因素。

10.6.2 设备原因的定位与排除

设备硬件故障引起业务中断，主要是因为设备各单板失效或性能劣化引起的。单板失效或性能劣化包括 OTU 波长转换单板、光放大板以及合、分波板。检查所有单板的指示灯闪烁情况，也可以在网管或设备上观察，根据告警信息来判断可能发生的故障原因。根据单板指示灯判断故障如表 10-2 所示。

表 10-2 根据单板指示灯判断故障

灯 状 态	原 因	操 作
某单板红、绿灯均灭	该板有故障	换板
某板红灯常亮	该板自检失败	排除外部、设备故障或换板
某板绿灯慢闪	该板脱机	拔板，换该板，换 SCC

10.6.3 案例 1：单板损坏导致业务中断

1. 系统概述

某工程为链形组网 16 波系统，目前系统中只配置了一波如图 10-4 所示。

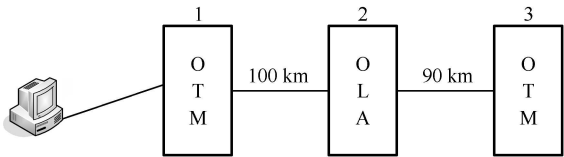


图 10-4 案例 1 工程组网图

2. 故障现象

维护人员发现 3 号站接收 1 号站的波长转换板 RWC 出现 RLOS 告警，SDH 的线路板同样出现 RLOS 告警。

3. 故障分析及排除

- (1) 首先检查电源及其他外部因素，没有出现异常。由此可以判断是设备本身出现故障。然后查询 1 号站和 3 号站间所有网元的告警和性能事件，发现整个系统除 3 号站外没有异常的性能事件和告警产生，初步判断误码产生在 3 号站与 1 号站之间的信号线路上。
- (2) 在 SDH 环路上设置强制倒换，保护业务不会在故障定位的时候发生频繁倒换。
- (3) 查询各站单板的输入\输出光功率均正常，3 号站 RWC 的收光功率为-11 dBm 正常。
- (4) 将 3 号站的 RWC 板的输入直接接入 SDH 的线路板的输入（SDH 接收端是宽带输入，紧急情况下如 RWC 损坏，可以将分波器出来的信号直接接入 SDH 的线路板中），发现 SDH 的线路板出现 B1SD 告警。由此判断故障可能在线路上也可能是单板损坏引起，

用发送波长转换板 TWC 替换 RWC（TWC 可以替换 RWC，但 RWC 不可以用做 TWC），发现 TWC 也出现 RLOS 告警，说明故障出在线路上的光放或发端的 TWC 上。

（5）在 1 站的 TWC 和 RWC 之间加衰减做环回，即将 TWC 输出的信号加 10 dB 的衰减器接入到 RWC 的 IN 口，发现 RWC 也出现 RLOS 告警，说明 TWC 输出的信号有问题。但网管上查询 TWC 的输入光功率正常，且没有任何告警，定位 3 站出现 RLOS 告警的原因是 TWC 单板故障。

（6）换下 1 站的 TWC 第 5 波后，换上 TWC 备板第 12 波，将 1 站 M16 的第 5 口和第 12 口的尾纤互换，在 3 站将 D16 的第 5 口和第 12 口的尾纤互换，业务恢复。

4. 结论和建议

在排除故障时要由外部到内部顺序排除引起故障的可能原因，灵活应用各种故障处理方法，如排除法、环回法等，同时要善于利用网管数据进行分析、判断。另外，对于业务重要的站点要做好备板的准备。

10.6.4 案例 2：光缆线路故障导致业务中断

1. 系统概述

某局骨干传输网采用某公司 WDM 设备组网，整个网络由几十端 WDM 网元组成，构成一个链型的结构，环上的传输速率是 2.5 Gb/s。网络结构如图 10-5 所示，图中只显示 4 端设备中心局设在 A 网元，网管终端放在中心局。

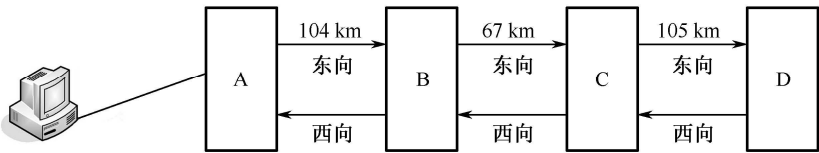


图 10-5 案例 2 网络结构图

2. 故障现象

- （1）B 站 A 上报 OLA 输入、输出无光告警，东向正常；OSCL 报西向输入光超限告警。
- （2）上级情况：C 站告警正常。
- （3）下级情况：A 站西向 OPA（收 B 站）输入\输出无光告警；ODU 输出无光告警。

3. 故障分析及排除

- （1）首先通过网管检查 C 网元西向 OBA 的发光是否正常。结果是 C 点 OLA 输入和输出光功率监测正常，只有 OSC 告警。不可能是 C 点 OLA 损坏。可能的原因是：光纤存在问题。
- （2）前往 B 点实际测量：西向输入无光，确认是线路光纤断裂。
- （3）用 OTDR 测试，找出故障点，融纤后系统恢复（告警消失，数据正常）。

4. 结论和建议

在压缩排除故障时，首先将主光通道故障和监控通道故障进行分离，多波长问题和单波长问题进行分离。本例的故障是多波长、主光通道故障。首先排除外部导致故障的因素，排除光线路问题。排除问题的方法就是首先通过网管检查各网元的发光是否正常，如果正常，说明发送部分没问题。检查收光是否正常，如果有光，且光功率正常，则线路没问题；如果无光或者光功率和正常值差异极大，则线路有问题。整治线路即可排除故障。需要注意的是，局方处理外部光缆线路故障要使用 OTDR（光时域反射计），必须将光板上的收发尾纤拔掉，避免 OTDR 发出的强光功率损伤光板上的光器件。

10.7 误码故障分析及处理

误码定义为系统设备实际运行时接收到的数据流的错误位，通常以 bit 来表示。对于高比特率通道的误码性能，是以块为基础的一组参数。通常以误块秒比 ESR、严重误块秒比 SESR、背景误块比 BBER 等来表示。

设备出现 B1-EXC，B2-EXC，B1-SD，B2-SD 告警即意味着设备出现了误码。误码问题的常见原因如表 10-3 所示。

表 10-3 误码问题的常见原因

故障类别	故障原因
外部原因	光功率过低
	光功率过高
	设备接地
	外界干扰
设备原因	OTU 单板失效或性能劣化
	光放大板失效或性能劣化
	风扇异常

10.7.1 外部原因故障的定位与排除

1. 光功率过低导致误码

在 WDM 系统中由于传输的距离比较长，设备有大量跳接的尾纤和衰耗器件以及法兰盘尾纤，接头接触不好或线路光缆中断以及外部环境的影响和细微的操作，都有可能使光纤的光功率衰减增大。所以，发现有误码时应及时检查各点光功率，如果是由于光缆性能劣化或接头衰耗过大导致系统产生误码，应及时修复光缆或调节光衰减器。

2. 光纤非线性原因导致误码

不仅光功率过低会导致系统产生误码，光功率如果过高也会产生误码，这主要是由于光功率过高会导致信号产生非线性畸变。我们可以通过网管查询系统的发送光功率，使其保持在指标规定范围内从而消除非线性导致的误码。

3. 外界干扰导致误码

机房内的空调电源等由于没有良好接地，这些电器的一次启动或停机都可能对光缆产生严重的电磁干扰，故产生误码。如果设备产生少量的不连续误码，可检查是否由于外界干扰并及时排除。

4. 接地不良导致故障

如果设备接地不好也会导致设备出现误码。所以，在维护时一定要注意检查设备接地是否良好。

10.7.2 设备原因的定位与排除

1. 单板性能劣化

如果是所有通道都出现误码，说明故障在线路上。**MPI-S** 和 **MPI-R** 之间需要重点检查系统的主通道，如果只是部分通道出现误码可能是系统正工作在临界状态或者是个别通道存在原因，如单站内的尾纤连接等，而与主信道无关，由此可以快速定位故障。

1) 波长转换板性能劣化

客户端信号在 OTU 单板上经过了 O/E/O（光/电/光）的复杂转换，所经环节较多。任何一个环节出现故障都会造成性能劣化，并进而造成误码。而且发端激光器波长不稳定、偏移过大或合波后相邻波长信号隔离度不够也会导致产生误码。OTU 单板上都有 B1 字节监控的功能，通过查询 OTU 单板的误码性能，可以看到出现误码的数量和时间，由于不带 FEC 功能的 OTU 单板只进行透明地传送，不对误码进行处理，由此可以判断误码是在哪段产生的。对于有 FEC 纠错功能的单板，如果 24h 误码量在单板纠错范围内，则能够正常工作，不会出现误码。但网管会上报纠错数，纠错数大小与误码量一致。如果是由于波长转换板性能劣化导致误码，可以通过换板来解决故障。

2) 光放大器性能劣化

掺铒光纤放大器的泵浦激光源可能会引入很大的 ASE 自激辐射噪声，会使接收端的信噪比过低，从而导致误码。如果是由于光放大器性能劣化导致误码，只有通过换板来解决故障。

2. 风扇异常

如果风扇出现异常情况，可能会造成设备温度升高，从而导致设备出现误码。风扇出现异常情况，一种可能是由于出风通道不畅，例如防尘网被堵塞，这时需要立即清洗防尘网。另一种可能是风扇本身故障，这就需要立即更换风扇来解决故障。

10.7.3 案例 1：光功率异常导致误码

1. 组网概述

某工程为 16 波的系统业务满配置组网如图 10-6 所示。

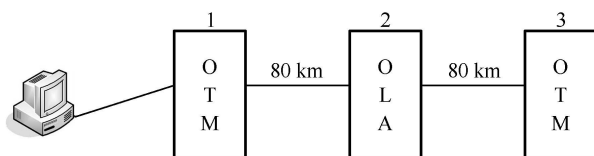


图 10-6 案例 1 组网配置图

2. 故障现象

某日挂表测试误码时，发现 CH1, CH2, CH3, CH4 通道出现少量误码。

3. 故障分析及排除

(1) 首先查询系统告警事件发现 1, 2, 3 站都没有异常告警。

(2) 查询性能事件，发现 3 站收 1 站的 CH1, CH2, CH3, CH4 出现误码，其他通道正常。

(3) 根据系统信号流检测 1 站发 3 站的各单板的光功率是否正常。先用网管查询 TWC，单板的接收激光器的型号都为 PIN 管，然后查询 1 站各接收 TWC 单板，15min 和 24h 性能数据中的输入光功率均为典型值 10 dBm 左右，检查 1 站发送点功放板 WBA 的输入光功率为 6 dBm，排除 1 站的问题。

(4) 查询 2 站的 WPA2 板位 + WBA8 板位接收的输入光功率。发现 2 板位 WPA 输入光功率为 17 dBm，正常为 12 dBm。8 板位的 WBA 的输入光功率为 10 dBm，比正常值 6 dBm 小了 4 dB。

(5) 查询 3 站接收 WPA，输入光功率为 17 dBm，比正常值小了 4 dB。用网管查询 RWC 单板的接收激光器的型号为 PIN 管。原则上配置了 WPA 板后面的接收 OTU，一般配 PIN 管的激光器，但也有特殊情况。查询 RWC 的输入光功率为 14 dBm，15 dBm 左右时光功率偏低。

(6) 上游站的功放板光功率下降，会导致下游站光功率同样下降。从查询可知误码的主要原因是 1 站发 2 站光功率衰减多了 4 dB 造成的。调整 2 站收 1 站 WPA 的光功率到正常值 13 dBm，3 站的误码消失。

4. 结论和建议

光功率下降是系统的一大隐患。为了能够及时地发现系统光功率的下降，开局和维护中应该将系统各点的光功率查询数据做一个备份。这样出现误码的时候，可以将出现误码时的光功率数据和以前的数据做一个对比，可发现光功率的变化，便于对误码问题的分析处理。在日常维护中，维护人员应当及时记录系统的光功率和各单板的接收、发送光功率，定时查询、及早发现。当发现光功率下降时，应当首先查明光功率下降的范围，特别要注意根据信号流找到接收光功率下降单板的共同点，这样就能够准确地定位故障点。

10.7.4 案例 2: 光尾纤问题导致误码

1. 系统概述

某局骨干传输网采用某公司 WDM 设备组网，整个网络由几十端 WDM 网元组

成，构成一个链型的结构，每波长承载的传输速率是 2.5 Gb/s。网络结构如图 10-7 所示，图中只显示 4 端设备，A 和 D 是一个复用段。A 到 D 开通了 5 个波长，波长 1 至波长 5。A，B，C，D 都是 OTM 站点，A 和 D 完成上、下业务，B 和 C 对业务进行中继处理。

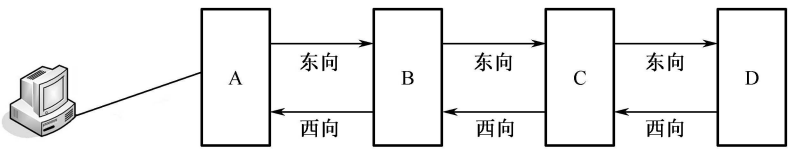


图 10-7 案例 2 网络结构图

2. 故障现象描述

网元 D 的 OTUR5 有误码。

3. 故障分析及排除

(1) 首先通过网管检查 D 网元上、下游复用段内的情况，区分是一个波长问题还是多个波长问题，是主光通道问题还是单波长问题。

(2) 检查 D 网元的东向上下游和其他四个波长的误码情况。结果是其他四个波长在本地没有误码性能上报，性能正常。东向下游各波长性能也正常。

(3) 检查东向上游各波长发现只有第 5 波在 B，C 的 OTUG5 上报误码，误码数量的同步情况和 D 一致。

(4) 于是可以定位误码是在 A 和 B 之间的东向段落上发生的。对于误码问题，一般情况下，最大的可能性在发端，通过网管检查 A 网元 OTU 的发光功率正常，无接收信号丢失的告警，由于 B 网元没有帧丢失的告警，可以判断 A 网元调制电路是没有问题的。

(5) 继续向下游检查 OMU 的输入和输出光功率，通过计算发现 B 站东向总输出光功率偏低，怀疑第 5 波输入弱光，前往现场检查，确实 OMU 第 5 波输入光功率很弱，检查为 OTU 和 OMU 之间连接尾纤故障（尾纤衰耗突变）导致，更换后恢复。

4. 结论和建议

对于误码故障首先必须用系统的观念来分析和处理，通过网管来检查各波误码和光功率情况，从而确定是主光通道的问题还单波长的问题，同时压缩故障段落，逐一排查。应该清楚每个测试点标称光功率值的计算方法，才能判断光功率值是否正常，从而能够定位故障。

10.8 业务瞬断故障分析及处理

业务瞬断故障随机性强，故障间隔时间较长，而且瞬断时间比较短，有些甚至在网管上监测不到，是故障处理中的一个难点。但瞬断故障主要有两个原因：一是设备工作不稳定；二是由于线路上的衰减出现突然的变化。

在实际的故障处理中我们往往是首先发现 SDH 系统出现倒换然后又很快倒换恢复，然后查询波分网管系统的历史告警才发现业务的瞬断现象。排除瞬断故障的思路是排除线路的原因，再考虑设备的问题，出现故障后要详细记录故障的区间、告警、光功率

等情况，并密切跟踪、掌握光功率变化的情况。

10.8.1 故障的定位与排除

利用光监控通道和主光通道接收灵敏度的不同，故障可以被简单地分为：

1) 双向瞬断，光监控通道和主光通道都出现瞬断

由于 WDM 设备的光监控通道和主光通道相互独立，一般不会同时出现故障，光监控通道和主光通道都出现瞬断说明主要原因可能是瞬间线路的衰减过大造成光信号严重劣化或中断，基本上可以排除设备原因。

2) 双向瞬断，光监控通道正常

本故障一般也由线路故障引起，光缆质量的劣化致使光功率处于主光通道接收灵敏度的边缘，但不影响光监控通道。可能会由以下几种情况产生：

- (1) 光缆的老化、频繁割接引起的光缆性能劣化；
- (2) 光缆割接或抢修时光缆类型不匹配致使衰耗指标合格，但影响了色散性能；
- (3) 光缆割接后引起中继段的距离变化，DCM 模块的补偿性能已不满足系统要求。

3) 单向瞬断，光监控通道和主光通道都出现瞬断

线路单纤质量劣化到光监控通道和主光通道都出现中断的可能性很小，人为故障的概率最大，如施工和设备维护时不小心碰了 ODF 上的尾纤或接头，或者尾纤布放时部分尾纤已经受损都会引起本故障。

4) 单向瞬断，光监控通道正常

本故障现象说明双向系统中的一个方向出现故障，既可能与线路有关，也可能由设备原因产生，设备故障的概率相对大一些。可以采用替换法进行排除，主要故障原因可能有：

- (1) 某一个方向的光放大盘故障；
- (2) 故障抢修时带通尾纤或衰耗器的型号不对；
- (3) 同一光缆内的单纤指标不合格。

10.8.2 案例：光缆不好导致业务瞬断

1. 系统概述

某工程为 80 G 波分工程 A 站和 D 站均为 OTM 站，中间有 B 和 C 两个 OLA 站，A 站和 D 站间有 4 波业务全部配置为 TWC 和 RWC 单板，工程组网图如图 10-8 所示。

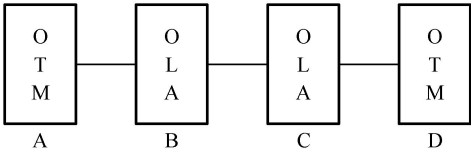


图 10-8 案件工程组网图

2. 故障现象

维护人员发现网管上 A 站到 D 站的所有网元都变红,几秒钟后告警消失。查询历史告警发现 A 站和 D 站的 RWC 接收都出现了 RLOS 告警,告警的时间为 12s,查询 SDH 端的接收同样发现瞬间的 RLOS 告警。

3. 故障分析及排除

(1) 维护人员首先检查 A 站和 D 站的网元的告警,没有发现 SC2 板位的监控信道的告警,监控信道没有断说明光纤没有断。

(2) 用网管检查功放板和 OTU 单板的输入输出光功率各点的光功率都处于正常值范围。

(3) 检查 A 站和 D 站的历史告警发现同样的 1~2 s 的告警,以前也出现过一次,而且产生告警都是同时产生,告警的板位都一样。

(4) 检查 A 站到 D 站各个网元的告警,发现 A 站发 D 站方向的信号流所经过的所有网元都出现瞬断的 RLOS,但 D 站发 A 站的信号流只有 A 站的。WPA 出现说明瞬断只与 A 站和 B 站有关。

(5) 由于所有网元都有告警,所以,判断是线路上出现故障。检查尾纤和接头没有松动,又检查 A 站和 B 站的光缆的情况,发现 A 站到 B 站是直埋和架空光缆的混合连接,光纤接头有 4 到 5 个,而且出现瞬断的时间天气很差,有大风雨。由此判断是线缆性能劣化。

(6) 将 A 站到 B 站的光纤全部换成性能很好的土埋光缆观察一个月,瞬断再也没出现。

4. 结论和建议

在 WDM 系统中,监控信道的接收灵敏度可以达到-48 dBm,但主信道的光信号在光功率低于-32 dBm 时,就可能会中断。如果监控信道和主信道同时出现 RLOS,说明光纤已经中断,但在光纤衰减较小的情况下则可能出现监控信道没有 RLOS,但主信道会出现 RLOS 告警。因此一般双向同时出现 RLOS 则光缆中断的可能性比较大,出现主信道断但监控信道没有断故障,则可能在线路上。

光纤线路性能劣化的故障很不容易发现,因为光功率一般情况下没有出现明显变化,这时维护经验就显得非常重要。

10.9 ECC 故障分析及处理

WDM 系统之间的通信是这样的,首先网管和网关网元之间通过 TCP/IP 协议传递信息,然后网关、网元和非网关网元之间通过 ECC 进行通信,最终实现了网管和非网关、网元之间的通信。

WDM 系统采用波长为 1 510 nm,速率为 2 Mb/s 的光监控信号。监控信号中 D1~D3 字节用于网元之间的 OAM 信息交流,在 NCP 板上有数个 SCC 串口专门用于处理 DCC 字节,每个 SCC 串口对应一路 192 Kb/s 的 DCC 通道。

ECC 故障的常见原因如表 10-4 所示。

表 10-4 ECC 故障的常见原因

故障原因	故障类别
外部原因	供电电源故障
人为原因	更换 ECC 板时没有修改拨码开关，导致网络中网元的 ID 重复
设备原因	SCC 板类型不匹配
	单板故障
	网线或 HUB 损坏
	网元有大量的性能事件数据上报到网管，造成 ECC 通道阻塞

10.9.1 故障的定位与排除

1. 检查设备是否具有其他故障现象

如果设备电源出现问题，会导致业务中断等现象，同时会导致网络 ECC 不能互通。这时必须立即维修供电设备或电源盒，尽快恢复 ECC 通信和业务，光路不通当然也会导致 ECC 不能通，但如果光路的故障影响到了 ECC，主信道同时也会产生大量告警和异常性能事件，因此业务也不可能正常运行，所以很容易判断故障原因。由于电源和光纤线路造成的 ECC 故障处理方法请参见本书相关业务和误码故障处理章节。

2. 检查设备 ID 是否重复

在 SCC 板上可以设置设备的 ID 号，更换单板时很有可能会忽视 ID 号，出现网络 ID 号重复等问题。从而导致组网设备 ECC 不通，这时只要更改 ID 号就可以恢复 ECC 通信了。ID 设置方法和注意事项请参见相关设备说明等内容。

3. 检查是否 SCC 单板类型不匹配

目前 WDM 系统使用的 SCC 单板有两种类型，即 SCC1，SCC2 和 SCC2。可选 3 个（D1~D3）或 9 个（D1~D9）DCC 字节进行通信。而 SCC1 只有 3 个（D1~D3）进行通信，所以在 SCC2 使用 9 个字节时，无法和 SCC1 互通，必须由技术工程师修改主机软件或换板，恢复 ECC 通信。

4. 检查是否单板失效

处理单板故障时，先复位故障站点的 SCC 板，如果还是不能登录，拔出此 SCC 板让 ECC 穿通，看能否登录下游网元，如果可以，说明是 SCC 单板的问题，如果不可以，可能是 SC2 板或 SC1 板有问题，更换 SC2 板或 SC1 板。

10.9.2 案例 1: SCC 板故障导致 ECC 不通

1. 组网概述

某局采用 WDM 链型组网方式，如图 10-9 所示。在 A 站设有网管，A，C 站配置 SC1 板，B 站配置 SC2 板。

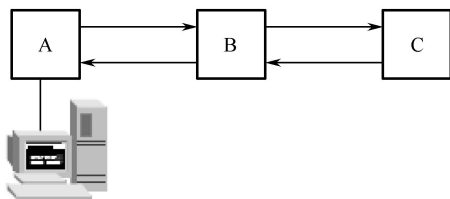


图 10-9 案例 1 工程组网图

2. 故障现象

A 站无法正常登录 B，C 站，业务正常。

3. 故障分析及排除

(1) 由于业务正常，所以判断不是光缆问题导致光信号衰减太大，也不是单站电源出现故障；

(2) 由此怀疑是 B 站 SCC 板故障或 B 站 SC2 板故障；

(3) 拔出 B 站 SCC 板让 A 站到 C 站的 ECC 穿通 A 站网管，可以登录 C 站，说明 SC2 板工作正常，重新插入 B 站 SCC 板，ECC 恢复正常。

4. 结论和建议

处理 ECC 故障时，直接复位故障站点的 SCC 板是暂时排除故障比较有效的方法。

10.9.3 案例 2: ID 冲突导致 ECC 不通

1. 组网概述

某局采用 WDM 链型组网方式，如图 10-9 所示。在 A 站设有网管，A，C 站配置 SC1 板，B 站配置 SC2 板。

2. 故障现象

B 站因有故障更换 SCC 板，更换后发现 A，B 站可以正常登录，而 C 站网元无法登录。

3. 故障分析及排除

(1) 在更换 B 站 SCC 板之前，网管终端能够登录所有网元，说明网管终端没有问题。同时也可排除线路和设备电源故障。

(2) 更换 B 站 SCC 板后无法登录 B，C 两站，可能的原因有：B 站 SC2 板或 C 站 SCC 板、SC1 板有故障导致无法登录 C 站；B 站的 SCC 板未重新拨 ID，ID 和 C 站有冲突。

(3) 复位 C 站的 SCC 板后还是无法登录 C 站。

(4) 检查 B 站 SCC 板的 ID，发现和 C 站的 SCC 板 ID 相同。

(5) 重新把 B 站 SCC 板 ID 设置为原 SCC 板的 ID 后，所有站点可以正常登录。

4. 结论和建议

更换备用 SCC 板时，一定要重拨 ID 拨码开关，使其与换下 SCC 板的 ID 保持一致，确保不能和已有的网元 ID 冲突。

10.10 公务故障分析及处理

公务故障的常见原因如表 10-5 所示。

表 10-5 公务故障的常见原因

故障原因	故障类别
外部原因	设备电源故障
	光纤故障
人为原因	话机设置错误
	SCI/SC2 板设置错误
	OHP 板设置错误
	OHP 板类型错误
设备原因	电路板失效或性能劣化
	铃流板失效或性能劣化

10.10.1 故障的定位与排除

1. 检查设备是否具有其他故障现象

如果设备电源出现问题，会导致业务中断等现象，同时会导致公务电话不能互通，这时必须立即维修供电设备或电源盒，尽快恢复公务和业务。光路不通当然导致公务电话不能通，但如果光路的故障影响到了公务，主信道同时也会产生大量告警和异常性能事件，因此业务也不可能正常运行。

2. 检查话机设置

很多公务问题都是由于话机设置不正确引起的：

- (1) 话机上的铃流开关 RING 应打在 ON 位置表明有来话时振铃；
- (2) 拨号方式开关应打在 T 位置即双音多频拨号方式；
- (3) 公务电话线一般插在子架的 PHONE1 口；
- (4) 公务电话在不通话时，应处在挂机状态。标志为公务电话正面右上角的红灯应不亮，如果红灯亮，说明未挂好机，按一下电话正面的 TALK 键挂机。有时维护人员不小心触到了 TALK 键使话机一直处在摘机状态，导致其他站的公务电话打不进来。

3. 检查机柜顶部铃流模块

如果电话没有振铃，排除不是话机的故障，则要检查机柜顶部电源盒 PMU 的铃流模块是否出现故障，如果出现故障，则更换 PMU 板。

4. 检查 SC1/SC2 板的参数配置

SC1/SC2 单板在网管上的配置，应该为“公务通过光口”，如果配置为“公务不通过光口”则该站和下游站的公务电话都不通。

5. 检查公务板 OHP 设置

更换 OHP 板时电话号码有可能会设置重复，检查全网 OHP 板设置的电话号码，包括所有站点 PHONE1, PHONE2, PHONE3 号码配置，保证没有重复的号码。

6. 检查 OHP 板

OHP 板由于电路模块较多比较容易损坏，这也会导致公务电话无法互通，如果 OHP 板发生故障，可以通过拔插 SCC 板把公务字节穿通来检查板是否发生故障，或者可以更换 OHP 单板来尝试。

10.10.2 案例 1: SC2 设置错误导致公务不通

1. 组网概述

A, B, C 三站是某局 WDM 系统链型组网结构。A 站配置 SC1 板，B 站配置 SC2 板，C 站配置 SC1 板。工程组网如图 10-9 所示。

2. 故障现象

A 站到 B, C 站公务不通，在 A 站拨打会议电话也不能呼叫 B 站和 C 站。

3. 故障分析及排除

(1) 主信道业务正常，而且 SC1, SC2 板的灵敏度达到-48 dBm，远小于其他单板，所以判断出不可能是光路问题。

(2) 检查 B, C 站公务话机设置没有问题。

(3) 将 B 站 SCC 板拔出让公务字节穿通，A 站还是拨不通 C 站，整个过程 ECC 均正常，所以 SC1, SC2 板损坏的可能性极小。

(4) 检查 B 站 SC2 板的配置时，发现 SC2 被配置为“公务不通过光口”，把配置改正为“公务通过光口”公务恢复正常。

4. 结论和建议

OHP 板损坏的可能性比较小，如果公务电话正常，但存在偶然拨打不通的现象，一般情况下都是配置被修改或话机挂机状态错误。

10.10.3 案例 2: 号码设置重复导致公务不通

1. 组网概述

A, B, C 三站是某局 WDM 系统链型组网结构，A 站配置 SC1, B 站配置 SC2 板，C 站配置 SC1 板。工程组网如图 10-9 所示。

2. 故障现象

A 站可以正常拨打 B 站，但 C 站无法拨通。从 B 站也无法拨叫 C 站，用会议电话也打不通。

3. 故障分析及排除

- (1) B，C 两站之间业务正常，所以不会是由光路引起的故障。
- (2) 检查 C 站的 SC1 板配置，公务配置为“公务通过光口”所以也不是配置问题。
- (3) 检查 C 站公务话机设置没有问题。
- (4) 检查各站的公务电话号码配置时，发现 A 站第二路公务电话号码与 C 站的第一路公务电话号码相同，把 C 站的第一路公务电话号码修改为与网上其他号码均不重复时，从 A，B 两站可以正常呼叫 C 站。

4. 结论和建议

每一块 OHP 板均可以配置 3 个公务电话号码，如果配置重复则两个号码都无法拨叫，上例中如果从 B，C 两站拨叫 A 站第二路号码（把 A 站的公务话机插在第二路公务电话）上，同样将无法打通。

10.11 设备对接故障分析及处理

设备对接是指 WDM 设备与其他设备如 SDH，IP 等设备进行连接并互通业务。设备对接故障的常见原因如表 10-6 所示。

表 10-6 设备对接故障的常见原因

故障原因	故障类别
外部原因	接入设备本身存在故障（如误码等）
	光纤连接错误
	光纤模式不匹配
设备原因	FEC 协议不匹配
	光器件损坏
	单板性能劣化

当发生设备对接故障时，首先应检查 WDM 设备上报的告警。通过告警可以初步分析、定位故障。与对接故障有关的告警及告警产生的可能原因如表 10-7 所示。

表 10-7 与对接故障有关的告警及告警产生的可能原因

告警名称	可能原因
R-LOS	光纤连接故障； 光接口板或光纤类型不匹配； 单板故障
R-LOF	光纤连接故障； 光接口板或光纤类型不匹配； 单板故障

告警名称	可能原因
R-OOF	光纤连接故障； 光接口板或光纤类型不匹配； 单板故障
B1-EXC	对接设备或本站设备出现误码
B1-SD	对接设备或本站设备出现误码
B2-EXC	对接设备或本站设备出现误码
B2-SD	对接设备或本站设备出现误码

10.11.1 外部原因故障定位与排除

1. 外部设备是否存在故障

设备对接时有可能是外部对接设备产生故障，这时需要经过测试来判断。如果确定是由于外部对接设备本身故障引起 WDM 设备告警，可以利用外部设备故障处理方法解决故障。

2. 光纤是否连接正确

按照已经贴好的标签，检查光纤是否插错。如果错位设备有可能不产生 R-LOS 告警，但会产生大量的异常性能值。这时需要重新正确连接光纤，有时光纤在测试时被自环对接测试完成后，一定要取消自环否则对接无法成功。

3. 光纤类型是否匹配

WDM 系统里一般都是采用单模光纤，如果采用多模光纤在局内传输，会造成很大的衰耗，甚至出现误码和其他故障。如果由于光纤类型不匹配而造成误码要立即更换光纤。更换光纤时需要注意颜色，多模光纤一般为橘红色，单模光纤一般为黄色。

10.11.2 设备原因的定位与排除

1. FEC 协议不匹配

目前 WDM 设备和 SDH 设备很多都采用了 FEC 编码来提高设备性能。但是采用的协议却有 G.975 和 G.709 两种，这两种协议的 FEC 编码不能互通，所以如果是由于这种情况出现故障必须更换单板。

2. 光器件损坏

由于接收光功率过高或其他原因造成了光器件的损害，也会造成设备无法互通，只有通过更换单板来解决问题。

3. 单板性能劣化

在设备对接过程中也有可能是 OTU 单板出现故障而导致对接无法成功。由于客户端信号在 OTU 单板上经过了 O/E/O（光/电/光）的复杂转换，所经环节较多，任何一个环节出现故障，都会造成性能劣化进而造成误码等故障，而且发端激光器波长不稳定，

偏移过大或合波后相邻波长信号隔离度不够，也会导致产生误码。如果是由于波长转换板性能劣化，导致设备无法对接成功，可以通过换板来排除故障。

10.11.3 案例 1：光纤错接导致设备对接故障

1. 组网概述

图 10-10 是某地采用 WDM 系统点对点组网图。A 站和 B 站 SDH-1，SDH-2 为接入 WDM 系统的 SDH 设备。

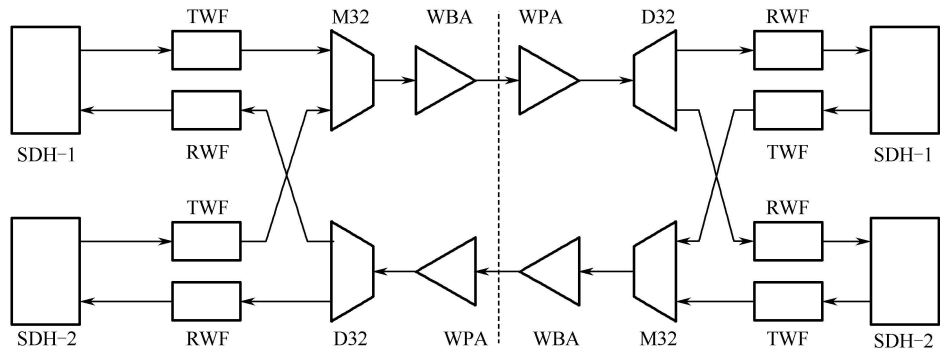


图 10-10 工程组网图

2. 故障现象

局方在 A 站 D32 板的输出端测量光功率，恢复光路时业务没有恢复。

3. 故障分析及排除

- (1) 由于测试之前业务没有故障，所以判断不是外部设备问题；
- (2) 按照信号流，检查各站各点的输入输出光功率，均与正常运行时测量值相差不大，属正常范围；
- (3) 发现 A 站 RWF 板上报大量的误码，A、B 两站业务全阻；
- (4) 考虑到测量时只把两根尾纤拔出测量光功率，所以两路尾纤插反的可能性最大，颠倒两根尾纤，业务恢复。

4. 结论和建议

这次事故是因为没有制作 D32 板输出端标签和维护人员的粗心大意造成。因为 D32 板的两路输出光功率差异不大，所以 RWF 板没有产生 R-LOS 告警输出。接入到 SDH 设备的光功率值也没有产生太大的变化，SDH-1 和 SDH-2 设备也没有发生 R-LOS 告警。所以整个光路光功率没有大的变化，这给故障定位造成一定的难度。

10.11.4 案例 2：单板损坏导致设备对接故障

1. 系统概述

某局采用开放式的 WDM 设备，如图 10-11 所示。3 个站点、2 个 OTM、1 个 OLA，

现场准备割接站点 1 和站点 3 之间的 2.5 G b/s SDH 设备。

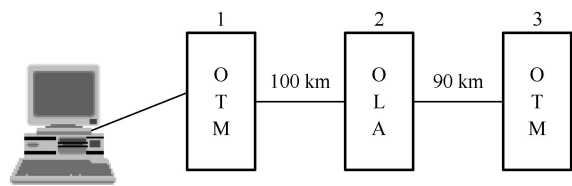


图 10-11 系统组网图

2. 故障现象

在 1, 3 站点把 2.5 G b/s SDH 接入到 WDM 设备上的 ODF 架, 1, 3 站点 TWC, RWC 都正常无任何告警, 但是 SDH 设备业务不通。

3. 故障分析及排除

处理步骤如下:

- (1) 在割接前, 曾经用仪表测试过业务 24 h 无误码, 所以判断 WDM 和 SDH 设备应该没有问题;
- (2) 测试 1 站点 RWC 的接收功率在正常范围说明光纤线路没有问题;
- (3) 断开 1 站点的 SDH 设备接入信号, 看到 1, 3 站点的 TWC 和 RWC 都开始有告警;
- (4) 断开 1 站点的接入信号按照信号流程应该只有 1 站点的 TWC 和 3 站点的 RWC 有告警, 而 1 站点的 RWC 和 3 站点的 TWC 不应该出现告警, 由此可以判断信号在某处被自环起来了;
- (5) 经过实际检查发现, 在 B 站点 TWC 和 RWC 通过一个衰减器被自环了, 解环后割接成功。

4. 结论和建议

波分设备每个通道在割接前都需要测试该通道的 24 h 误码。一般的做法都是在对端的 RWC 的 OTU 口与 TWC 的 IN 口之间加上一个固定衰减器来自环测试, 但结束后, 维护人员往往忘记解环, 给割接带来隐患。

第 11 章 常用测试仪表及使用

11.1 ONT-30 光谱分析仪

ONT-30 是用于纯光测试的通用测试平台。ONT-30 是一台精巧的、重量轻的主机，带有专门用于光测试应用的两个模块插槽；提供三种不同类型的光谱分析仪（OSA）以及一台光 Q 因子测量仪模块；覆盖 C、L 与 S 波段，可以提供无可比拟的速度以及独特的双端口 OSA 功能；其测试结果显示在一个大的 12.1 in（1 in=2.54 cm）的 TFT 彩色触摸屏上。

1. 面板介绍

ONT-30 光谱分析仪面板图如图 11-1 所示。

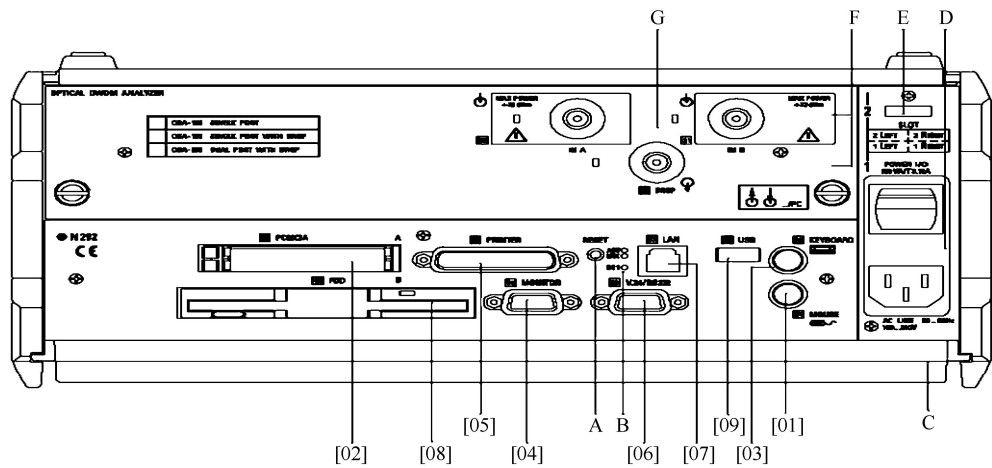


图 11-1 ONT-30 光谱分析仪面板图

图 11-1 标注如下：[01]——鼠标(PS/2 接口)；[02]——PCMCIA 卡插槽，2 个；[03]——鼠标(PS/2 接口)；[04]——视频输出口 VGA；[05]——并口：打印机接口；[06]——串口：V.24/RS-232；[07]——以太网接口：RJ45；[08]——软驱：IBM 兼容；[09]——USB 接口。

A——热启动按键；B——状态灯，包括三种状态（ACT——以太网接口激活；LNK——与计算机建立了连接；HD1——硬盘或软驱工作）；C——显示器；D——电源及保险；E——串口；F——插槽；G——测试模块。

2. 主要功能模块

ONT-30 采用了模块化的结构，具有由软件支持相应测试功能的不同硬件模块，可由用户根据不同的需要，在主机上插拔而进行组合，用户还可以直接从 Internet 下载最

新版本的软件，以使 ONT 可以随时在最新的状态下投入使用。

作为一个平台，ONT 有以下模块或功能供选择使用：

- (1) 光 Q 因子测仪 (OQM)；
- (2) DWDM 光谱分析仪 (OSA)；
- (3) PMD 测试功能；
- (4) 2.5/2.7G FEC OTN 测试模块。

3. WDM 系统与仪表的连接

ONT-30 平台上可插入光谱分析模块：OSA-160 和 OSA-200，其中 OSA-160 模块为单端口输入模块，OSA-200 为双端口输入模块，如图 11-2、图 11-3 所示。

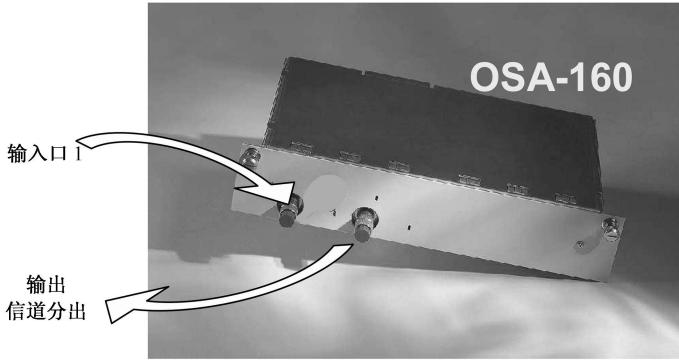


图 11-2 OSA-160 模块端口说明

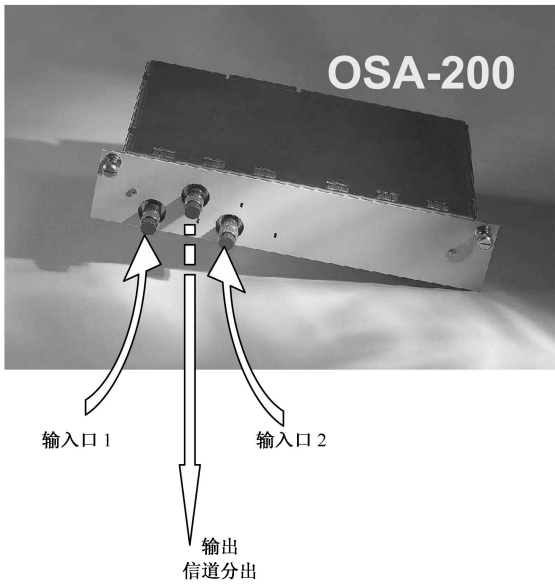


图 11-3 OSA-200 模块端口说明

1) 单端口光谱仪测试连接

对于目前的 WDM 系统，系统最大输出光功率为 +20 dBm，而 OSA-160 测试模块的输入口 1 可接收的最大光功率为 +23 dBm，故被测试 WDM 系统测试参点引出的光纤可

直接连接到 OSA-160 测试模块的输入口 1 上（对于输出功率超过 +23 dBm 的被测系统，要加上光衰后再测试），如图 11-4 所示。

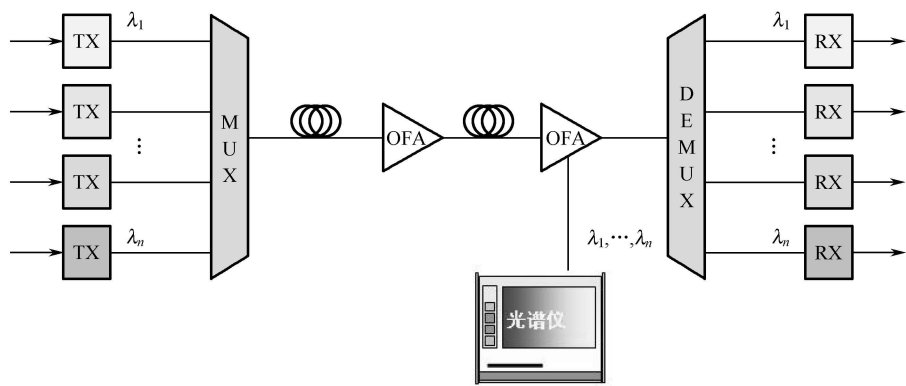


图 11-4 单端口输入光纤连接

2) 双端口光谱仪测试连接

OSA-200 测试模块可在同一地点同时对两个独立 DWDM 信号进行测量，提高测试效率，双端口输入光纤连接如图 11-5 所示。

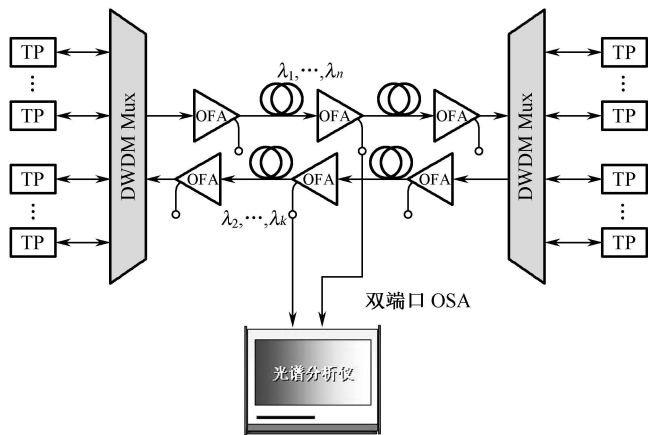


图 11-5 双端口输入光纤连接

3) 信道分出功能

光接口的物理参数测试是必须的，但是并不保证服务质量（QoS）。服务质量（QoS）是由误码率 BER 清楚定义的，因此对每一个单独信道进行详细的分析是必须的。光谱分析仪可把 DWDM 系统中的任意一路分出来接到 SDH 分析仪进行详细的分析，它和 SDH 分析仪配合工作，如图 11-6 所示。

OSA 模块提供可选择的滤波器，测试者可指定任意的信道输出，信道分出功能示意图如图 11-7 所示。

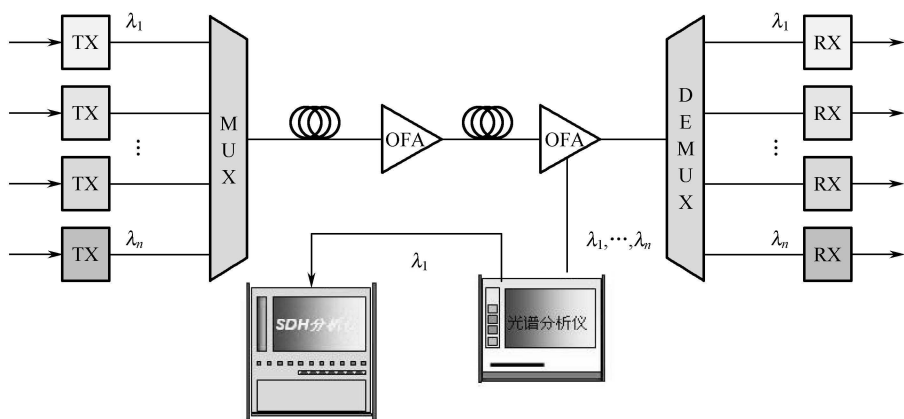


图 11-6 光谱仪和 SDH 分析仪配合工作

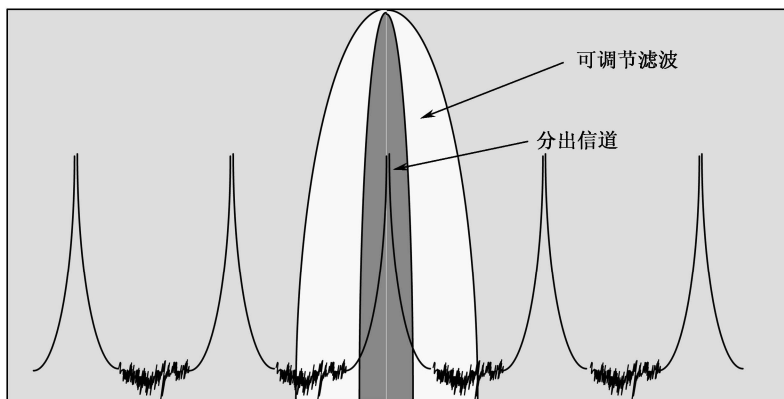


图 11-7 信道分出功能示意图

4. 仪表通用测试步骤

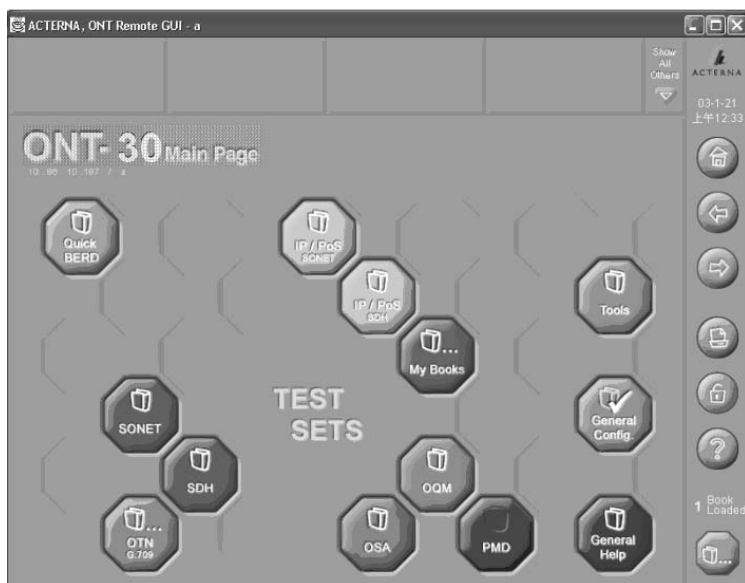
1) 开机

打开 ONT-30 的电源开关，ONT-30 会自动进行初始化，1 分钟左右会出现主界面，如图 11-8 所示。

ONT-30 主界面采用浏览器风格的 ONT 界面，测试项目以“Book”方式出现：每一个测试功能对应一个“Book”，直接单击相应的“Book”，仪表可直接调出相应测试功能的界面，ONT-30 可同时调用 3 个“Book”，在同一时间完成多个测试项目。

ONT-30 有三种操作方式：

- (1) 触摸屏幕，用户可直接用触摸笔操作，该方法尤其适合现场测试；
- (2) 用鼠标进行操作；
- (3) 使用外部 PC 进行远程控制和操作。



A——光谱分析“Book”；B——“Q”因子测试“Book”；C——PMD“Book”

图 11-8 ONT-30 主界面

下面以最普通的触摸笔操作为例来说明。

2) 调出光谱分析仪表的测试模块

用鼠标单击“OSA”book，启动 WDM 测试模块，WDM 测试主界面如图 11-9 所示。

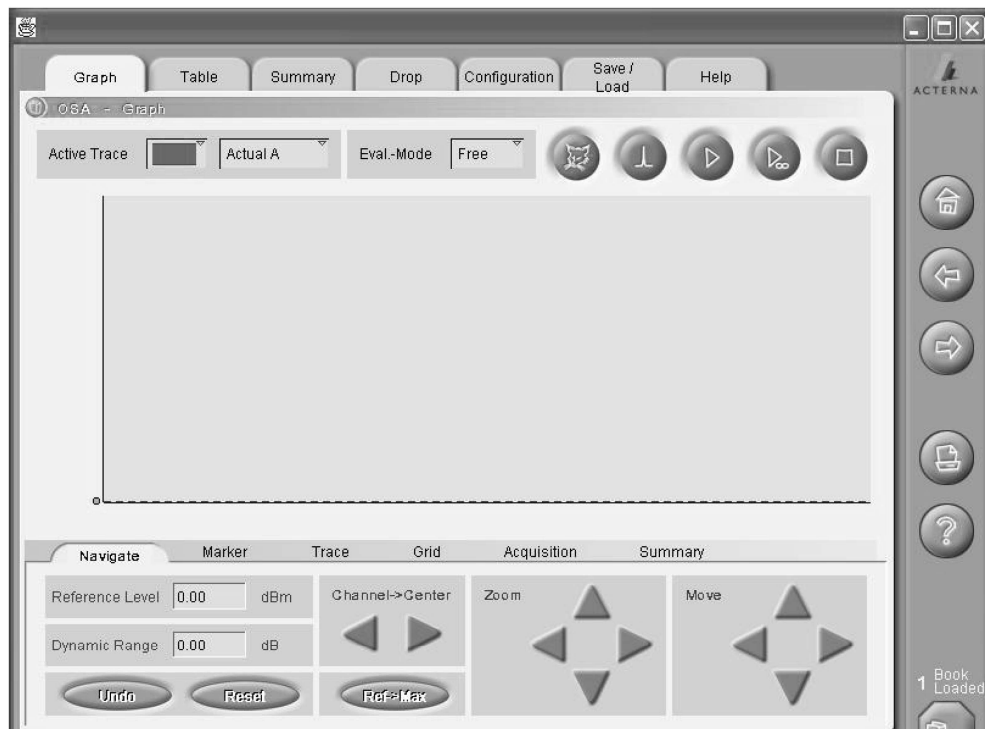


图 11-9 WDM 测试主界面

(1) “Graph” 和 “Table” 说明：单击 WDM 测试主界面上部的 “Graph” 和 “Table” 按钮，可在图形化的测试结果和表格化的测试结果之间进行切换。一般来说，测试者可先看图形化的测试结果，定性看被测 WDM 系统中的情况，如波的数目、各信道的功率，监测信道等。表格化的测试结果用来定量评估被测试系统的相关参数，如中心波长、各信道的功率、信噪比等。

(2) “Summary” 按钮说明：“Summary” 按钮可看测试结果是否符合 “Configuration” 设置下的条件。

(3) “Drop” 按钮说明：用于实现信道分出功能，参见图 11-9 和图 11-10。






(4) “Configuration” 按钮说明：用于测试之前对仪表进行设置，详见 11.2 节。

(5) “Save/Load” 按钮说明：光谱分析仪表上可存储测试的设置和测试的结果两种存储方式。

(6) “Active Trace” 和 “Active A (B)” 按钮说明：由于 OSA-200 测试模块可双端口输入，可通过 “Active Trace” 选定 A (B) 端口测试谱线的颜色，A (B) 端口测试的曲线可以不同的颜色显示。

(7) “扫描测试按钮” 按钮说明：详见表 11-1。

表 11-1 扫描测试按钮说明

OSA Book 上的按钮	按钮的作用说明
	该按钮为自动测试功能，系统可实现对被测试的波分系统进行自动的配置，自动给出测试的结果，使用起来十分方便
	单次扫描，通常用于一般维护性测试
	多次扫描，多用于排除障碍时使用
	分波，可从多路波中分出一路波接入到 SDH 仪表中进一步分析
	扫描停止

(8) “Navagate” 按钮说明：用户对图形界面进行控制，可测试的光谱进行缩放、平移，使图形处于屏幕的中央位置，并可调节参考电平和动态范围。

(9) “Marker” 按钮说明：用户可对不同的测试谱线进行计算，既可找到测试 A 端口的测试曲线和 B 端口的测试谱线，也可调用历史谱线，可自动找到各谱线的最大值和最小值，并可进行差值运算。

(10) “Acquisition” 按钮说明：可设定光谱测试的频段，可选 “Auto (自动)”、“C 波段”、“C 波段+L 波段” 以及整个测试范围 (1 280~1 650 nm)。一般来说选 “自动” 即可，但某些特殊场合，如被测试系统使用了监测通道 (非 DWDM 系统工作波长)，使用者可用 “Acquisition” 功能去除监测通道。

(11) “Summary” 按钮说明：对测试结果进行判决。

(12) “Configuration” 的说明：“Configuration” 设置包含 “Acquisition” 和 “Evaluation” 的设置，测试者可以根据需要改变相应的设置。

Acquisition 设置界面如图 11-10 所示。

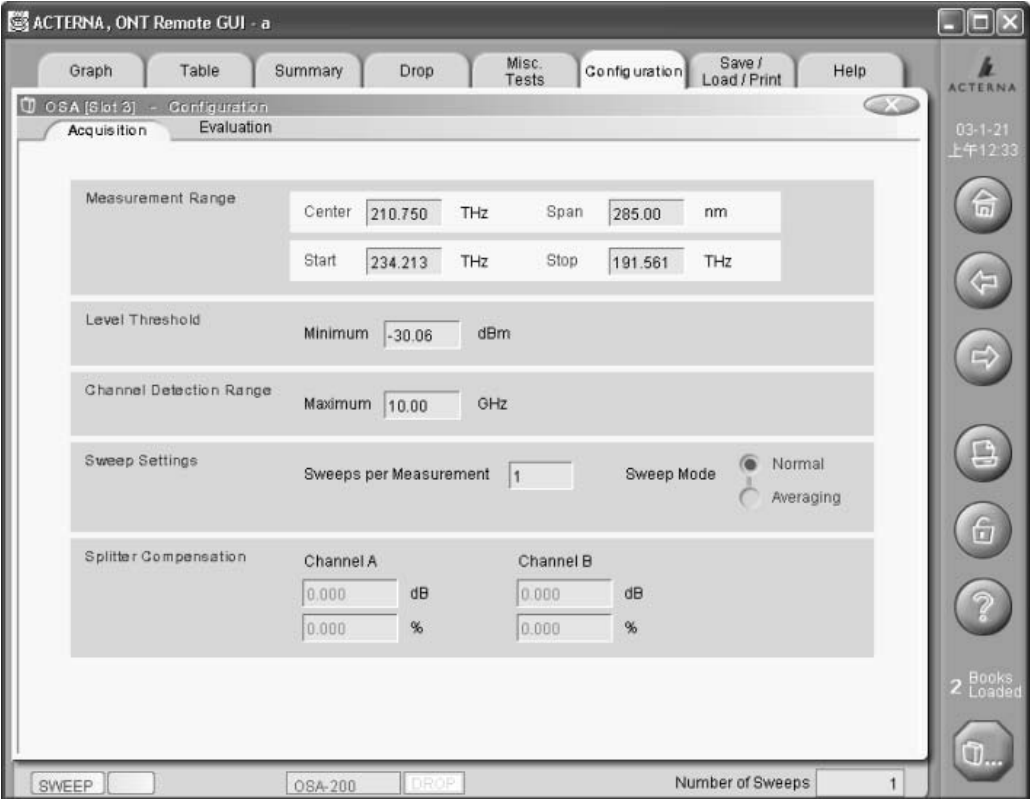


图 11-10 Acquisition 设置界面

- “Measurement Range”（测试范围）。根据光纤传输的特征，可以将光纤的传输波段分为 5 个波段，它们分别是：O 波段（original band），波长范围为 1 260~1 360 nm；E 波段（extended band），波长范围为 1 360~1 460 nm；S 波段（short band），波长范围为 1 460~1 530 nm；C 波段（conventional band），波长范围为 1 530~1 565 nm；L 波段（long band），波长范围为 1 565~1 625 nm。
一般来说，现在开通的光纤系统一般开通在 C 波段，然后用 L 波段、E 波段和 O 波段，用户若已经知道自己所用波分系统的波长范围，则可在 “Measurement Range” 测试窗口中人为设定中心波长，测试的起始波长和末端波长，仪表只监测测试者所设定的波长范围，提高测试的效率。
- “Level Threshold”（阈值）。用于隔离噪声与故障波和正常波的一种手段。对于有光放大器的系统，光放大器在放大了信号的同时也放大了噪声。我们可以把 “Level Threshold” 置于高于噪声平台，用于隔离噪声。
- “Channel Detection Range”（信道检测范围）。现在开通的 WDM 系统波长间隔为 1.6 nm、0.8 nm、0.4 nm 或更低，对应约 200 GHz、100 GHz、50 GHz 或更

低。该值设定应高于测试系统实际波长间隔，例如，0.4 nm 系统可设置该值为 100 GHz，50 GHz 或更低。

- “Sweep Settings”（扫描设置）。应能设置每次测试扫描的次数，设置扫描的模式为正常模式还是平均模式。
- “Splitter Compensation”（分光补偿）。波分系统测试和普通 SDH 系统在测试上的重要区别，是波分系统不能因波分系统中的某一路光出现故障而中断系统进行测试。一般来说，系统分光为 5% 左右，此时应输入补偿因子。如分光器输出的为主光通道的 10% 光，则应输入 “10 dB” 和 “10%”。

Evaluation 设置界面如图 11-11 所示。

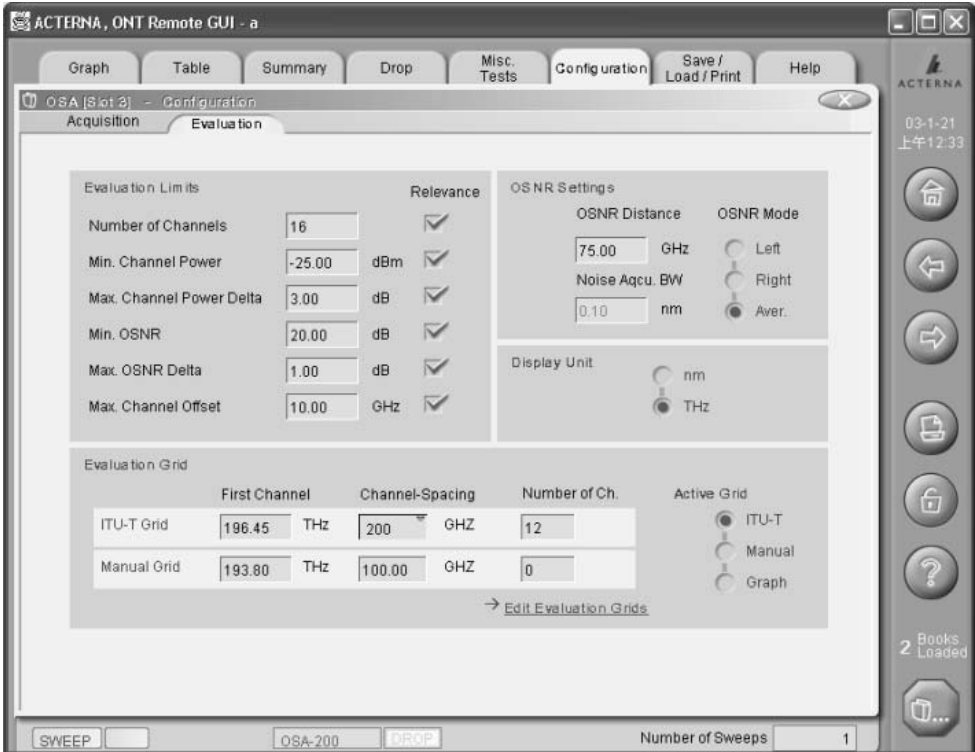


图 11-11 Evaluation 设置界面

- “Display Unit”（显示单位）可在 THz 和 nm 之间切换。
- “OSNR Settings”。“Noise Acq. BW”（噪声捕获带宽）应选 0.1 nm。“OSNR Mode”（光信噪比模式）可选择 “Left” 或 “Right” 以及 “Aver”，由于工作波长左、右噪声平台不同，不同的信噪比定义会得到不同的光信噪比数值。用户可根据实际情况自行选择。
- “Evaluation Limits”（评估条件）。测试者可更根据测试系统的实际情况来自行设定条件，用于对被测试系统是否通过测试给出判决。
“Number of Channels” 为信道个数，测试者可根据实际开通的波数来设定该条件。举例来说，实际 WDM 系统最多开通 32 个波，但目前只开通了 8 个波，测试人员可在 “Number of Channels” 后面的数字框里输入 “8”。

“Min Channel Power”为最小通道功率，测试者可根据系统对每个波长的最小功率的规定来输入最小的值，系统会自动给出判决。“Min Channel Power Delta”为最大信道功率差；“Min OSNR”为信道最小光信噪比；“Max OSNR Delta”为最大光信噪比差；“Max Channel offset”为最大中心波长偏移。

- “Evaluation Grid”判决栅格。系统各信道的分配符合 ITU-T G.692 规的中心波长，测试仪表已经内置了 IUT-T G.692 的模板，测试人员调用即可，但对研发厂家可能需要使用非 IUT-T 建议的中心波长，测试者可选择手动测试的方法自己定义中心波长参考模板。选择“Manual”可自己设置。

3) 常见测试项目及自动测试

WDM 系统要求测试的指标较多，且不同器件（如 OTU、OFA）要求测试的项目各有不同，详细的测试要求参见相关的国家标准，但常见的测试项目如图 11-12 所示。

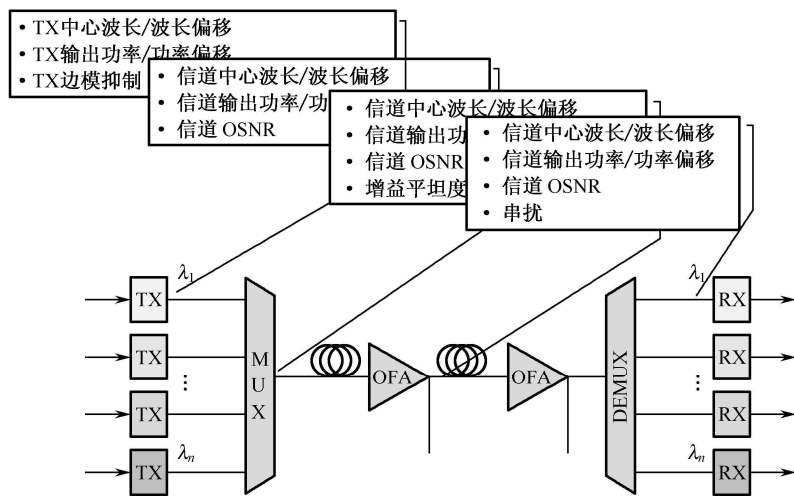


图 11-12 WDM 系统常见测试项目

ONT-30 自动测试功能快速方便，测试者可不必对“Configuration”菜单逐项设置，系统会自动检测系统的频率间隔，并调用 IUT-T 相应的模板，如图 11-13 所示。单击“Table”按钮，测试表格形式的结果如图 11-14 所示。

4) -20 dB 带宽及边模抑制比测试

切换测试界面到“Misc.Tests”菜单上，选择“DFB Laser”，在 Peak Wavelength 窗口中选择被测试的中心波长，如图 11-15 的 1 528.75 nm，按下“Acquire”按钮，在“Spectral Width”内读出的值即为所测试波长的“-20 dB”带宽。SMSR 窗口显示的值即为被测试波的边模抑制比。

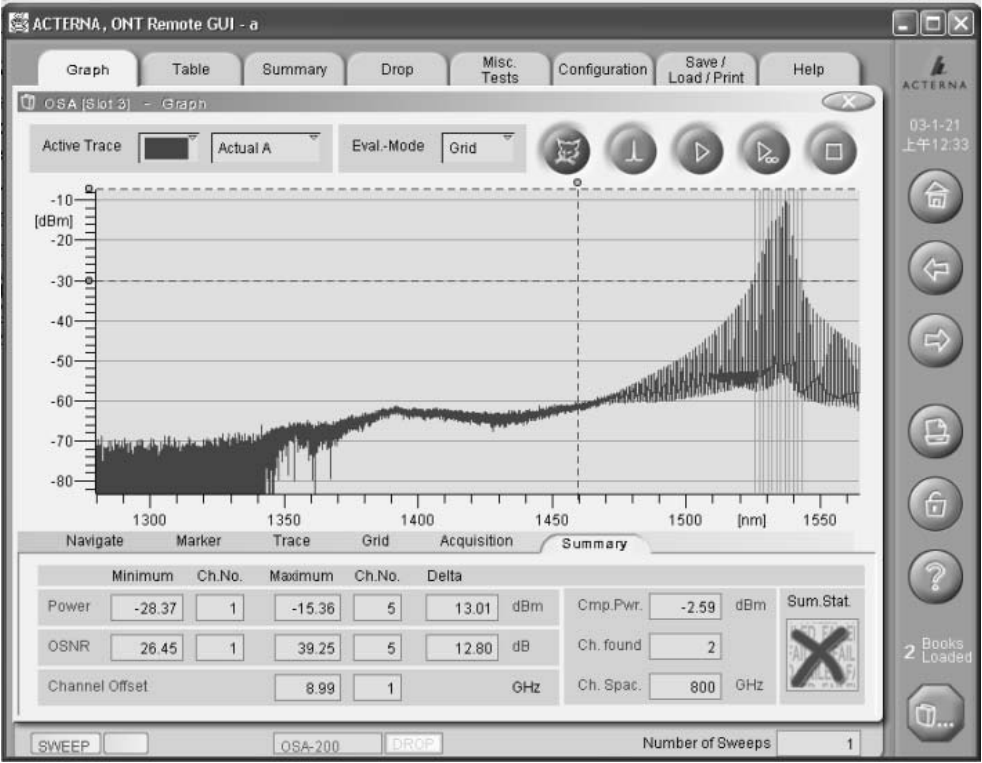


图 11-13 图形模式下测试结果

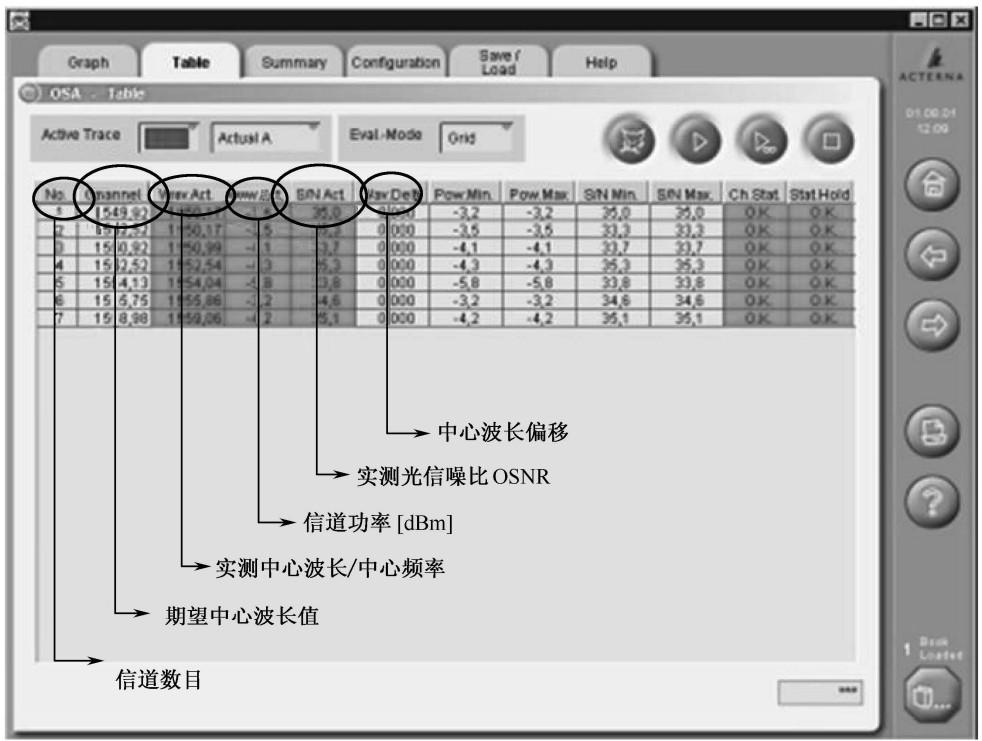


图 11-14 Table 模式下测试结果

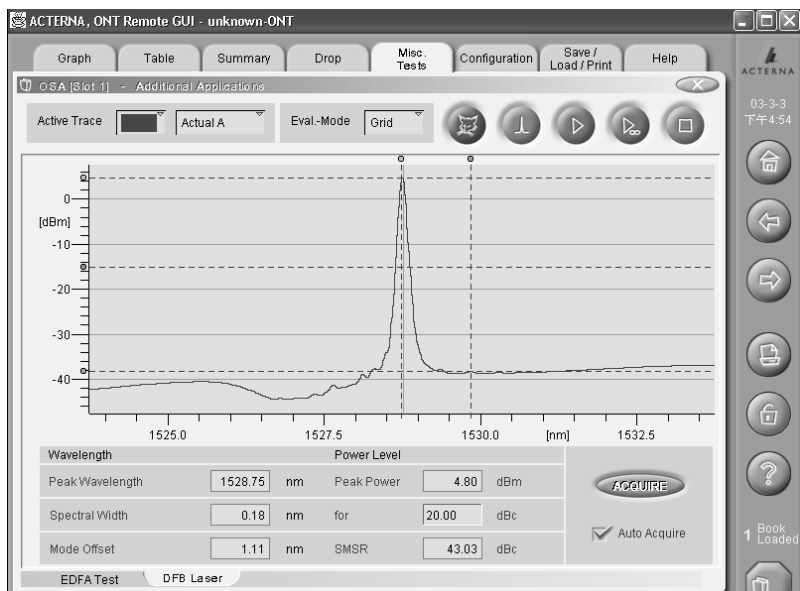


图 11-15 -20 dB 带宽和边模抑制比的测试

11.2 ANT—20SE 光传输分析仪

ANT—20/20SE/10Gig 产品是 Acterna 公司生产的 SDH 网络综合分析仪，它采用模块化设计，其操作平台为 Windows 界面风格。

1. 面板图

ANT—20/20SE/10Gig 的正面板如图 11-16 所示。

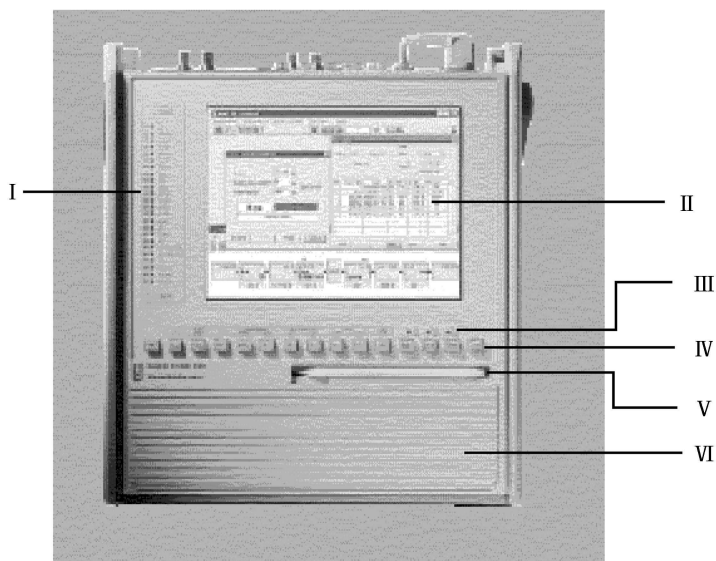


图 11-16 ANT—20/20SE/10Gig 正面板

I ——两排告警指示灯，左面为历史告警，右面为当前告警；

II ——大显示屏，根据用户要求可配置成触摸式；

III ——热键功能指示和键盘状态指示；

IV ——热键；

V ——触摸屏操作笔；

VI ——嵌入式键盘。

正面板的两侧是通风口，并且在内部安装了空气过滤片，底部有支架，可将仪表支起来；也可用仪表的板盖将仪表支起来。

ANT-20E 的所有测试端口在顶部，每一个测试端口都有编号，分别为：

〔01〕为外接鼠标接口；

〔02〕为 PCMCIA 接口；

〔03〕为外接键盘接口；

〔04〕为外接显示器接口；

〔05〕为打印机接口；

〔06〕为 V.24 接口；

〔08〕为软盘驱动器；

〔90〕、〔91〕、〔92〕为分光器的三个接口，其中〔90〕为 100%输入口，〔91〕为 10%输出口，〔92〕为 90%输出口；

〔10〕，〔11〕为 75 Ω 阻抗支路口，〔10〕为输入口，〔11〕为输出口；

〔12〕，〔13〕为 120 Ω 阻抗支路口，〔12〕为输入口，〔13〕为输出口；

〔14〕，〔15〕为 155 Mb/s 线路电口，〔14〕为输入口，〔15〕为输出口；同时，该两端口还可通过软件设置成任何速率的 PDH 端口（2 Mb/s，8 Mb/s，34 Mb/s，140 Mb/s）；

〔16〕为 622 Mb/s 电口输入端；

〔17〕，〔18〕为 155 Mb/s 和 622 Mb/s 的光口，〔17〕为输入口，〔18〕为输出口；

〔21〕为 155 Mb/s 和 622 Mb/s 的数据通道输入/输出口；

〔22〕为时钟输出口；

〔25〕为外接参考时钟输入口；

〔26〕为触发输入、输出端口；

〔30〕为抖动外调制信号输入口（适用于 622 Mb/s 及其以下速率）；

〔31〕为抖动解调输出口（适用于 622 Mb/s 及其以下速率）；

〔35〕为漂移测试参考时钟输入（适用于 622 Mb/s 及其以下速率）；

〔40〕为 STM-16 DCC/ECC 通道；

〔41〕为 2.5 GHz 时钟输出；

〔43〕为 2.5 Gb/s 电口输入；

〔44〕为 2.5 Gb/s 光口输入；

〔46〕为 2.5 Gb/s 电口输出；

〔47〕为 2.5 Gb/s 光口输出；

〔50〕为 2.5 Gb/s 抖动外调制信号输入；

〔51〕为 2.5 Gb/s 抖动解调输出；

〔54〕为 2.5 Gb/s 漂移测试参考时钟输入；

〔102〕, 〔112〕, 〔124〕 为 10 Gb/s 电口时钟输出;

〔110〕 为帧脉冲输出;

〔100〕 为帧脉冲输入;

〔123〕 为 10 Gb/s 电口时钟输入;

〔125〕 为抖动外调制信号输入;

〔103〕 为 10 Gb/s 光口输入;

〔113〕 为 10 Gb/s 光口输出。

2. 主要技术性能

(1) 支持的接口速率为:

SDH: STM-1 (电口), STM-1 (光口), STM-4 (光口), STM-16 (光口), 在光口提供可选的波长 1 310 nm(和/或), 1 550 nm, STM-64 (电口, 1 550 nm 光口);

PDH: 2 Mb/s, 8 Mb/s, 34 Mb/s, 140 Mb/s。

(2) SDH 版本支持的映射方式: C12, C3, C4 以及 ATM 和 Bulk 填充。

(3) 测试时钟可由仪表内部产生, 也可由外部同步时钟输入。

(4) 支持 PDH 中的复用/解复用功能, 64 K/140 M 逐级, 跳级均可。

(5) 支持 ATM 业务的测试, 提供 STM-1/4/16/64 映射, STM-4c/STM-16c/STM-64c 映射, E4 映射, E3 映射, DS3 映射和 E1 映射; 具有两种 ATM 测试模块: ATM 模块和 BAG 模块, 适用于 PVC 和 SVC 的测试。

(6) 在抖动和漂移的产生与测试方面, 可从 PDH 的 2 Mb/s, 8 Mb/s, 34 Mb/s, 140 Mb/s, 一直到 SDH 的 155 Mb/s, 622 Mb/s, 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s, 并且在不需另外的 PC 情况下可完成 MTIE/TDEV 的脱线分析, 具有抖动对应时间的变化曲线图, 可长期监测抖动的变化。

(7) 提供远程控制和远程操作功能, 可通过 V.24 或 GPIB, LAN(TCP/IP)进行远程控制和操作。

(8) 提供丰富的自动测试序列, 可用于集成和生产线测试。

(9) 不仅提供 ITU-T 的标准滤波器, 并且提供了比 ITU-T 标准更多的滤波器。

(10) 提供 APS 倒误时间的测试和时延测试, 精度可达 1 ms。

(11) 提供断电保护功能, 可使已测试的结果不丢失。

(12) 可长时间在线监测。监测时间可达 99 天之久, 并且测试结果可打印输出, 打印报告具有用户自定义的风格。

(13) 在电口上提供 75 Ω 或 50 Ω 的端口, 支路口提供 75 Ω 和 120 Ω 两种阻抗端口, 光口上提供通用的光适配器。

(14) 提供通过模式, 可对支路信号进行分解和插入, 并且在通过模式下对信号进行加抖和加误码的功能。

(15) 提供字节捕捉功能, 可对开销字节进行捕捉。

(16) 提供 TCM (串联连接监测) 事件发生功能。

(17) 提供自动扫描和自动查找功能。

(18) 提供了触发功能。

(19) 内部时钟稳定度为 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。

3. 测试项目操作步骤

ANT-20SE/10Gig 的软件采用“虚仪表”设计，即完成一定对应测试功能的软件模块，在 ANT-20E 的 SDH 版本共提供了 Anomaly/DefectAnalyse, Anomaly/DefectInsertion, Jitter Generator/Analyser, Overhead Generator, Overhead Analyser, PDH Generator/Analyser, Performance Analysis, Pointer Generator, Pointer Analyser 9 个虚仪表，分别完成异常/缺陷的分析，异常/缺陷的发生，抖动发生和测试，开销发生，开销分析，PDH 发生/分析，性能分析，指针发生，指针分析 9 个功能。还有一个虚仪表，SignalStructure（信号结构），用来完成测试信号结构的设置和一些其他的设置，所有的虚仪表由 Application 虚仪表来管理。每一个虚仪表都有自己的菜单，用于各对应测试项目参数的设定，如图 11-17 所示。

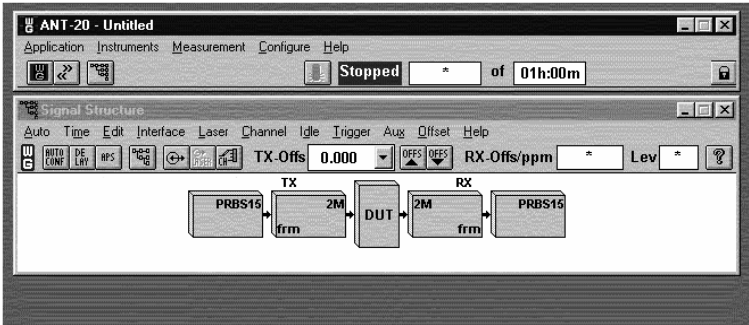


图 11-17 ANT-20SE/10Gig 测试主界面

各个虚仪表的调用和删除通过“应用”虚仪表的 Instruments（仪表）菜单来操作。在 Instruments 菜单中有 Add&Remove 项，单击该项，可弹出对话框如图 11-18 所示。

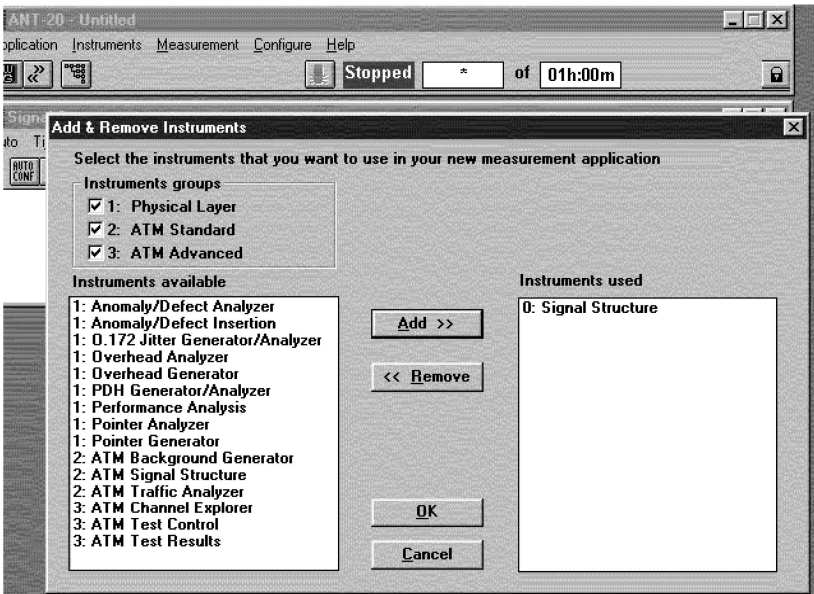


图 11-18 Add&Remove 项界面

通过选择左边框中的虚仪表，再单击“Add”按钮，可选中该虚仪表到右边框中，再单击“OK”按钮确认，完成虚仪表的添加。同时，也可选择右边框中的虚仪表，单击“Remove”按钮，使被选的虚仪表到左边框中，单击“OK”按钮确认，完成对虚仪表的删除。

在信号结构虚仪表中，通过 Edit 菜单中的 Signal Structure 完成对信号结构的编辑，选中该项时，会弹出编辑对话框（参见 11-19），通过该对话框完成对信号结构的编辑，其他各个虚仪表及其菜单会在操作方法中详细描述。

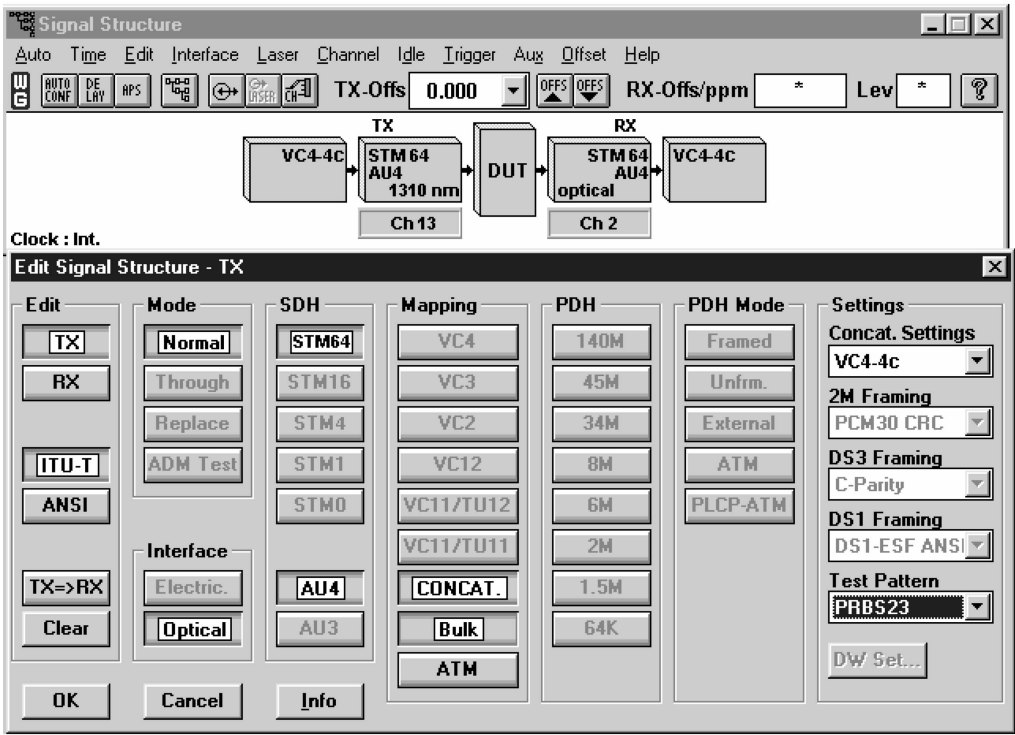


图 11-19 Signal Structure 项界面

4. 操作方法

1) 差错测试（比特差错，块差错，差错性能分析）

测试连接示意图如图 11-20 所示。

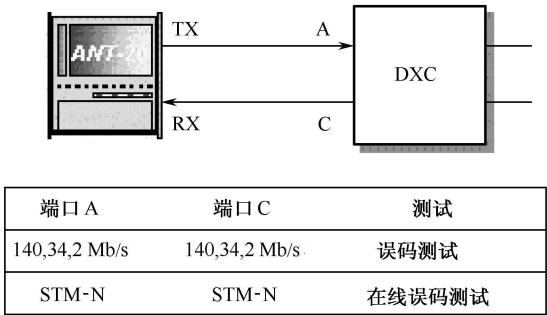


图 11-20 测试连接示意图

测试端口速率可以通过信号结构的编辑功能进行设置，如果在电口上进行测试，则选择〔14〕,〔15〕端口，其速率可设置成 2 Mb/s, 8 Mb/s, 34 Mb/s, 140 Mb/s 和 155 Mb/s。如果在光口上进行测试，则选择〔17〕,〔18〕端口，该端口速率可设置为 155 Mb/s 和 622 Mb/s，如果测试端口速率为 2.5 Gb/s，则选择端口〔44〕,〔47〕。如果测试端口速率为 10 Gb/s，则选择端口〔113〕,〔103〕。

测试时所用虚仪表有：

- I . Application （应用）虚仪表；
- II . Signal Structure （信号结构）虚仪表；
- III. Anomaly / Defect Analyser（异常/缺陷分析）虚仪表；
- IV. Performance Analysis （性能分析）虚仪表。

第一步：选择 Application 虚仪表中的 Instruments 菜单中的 Add &Remove Instruments 对话框，如图 11-21 所示。

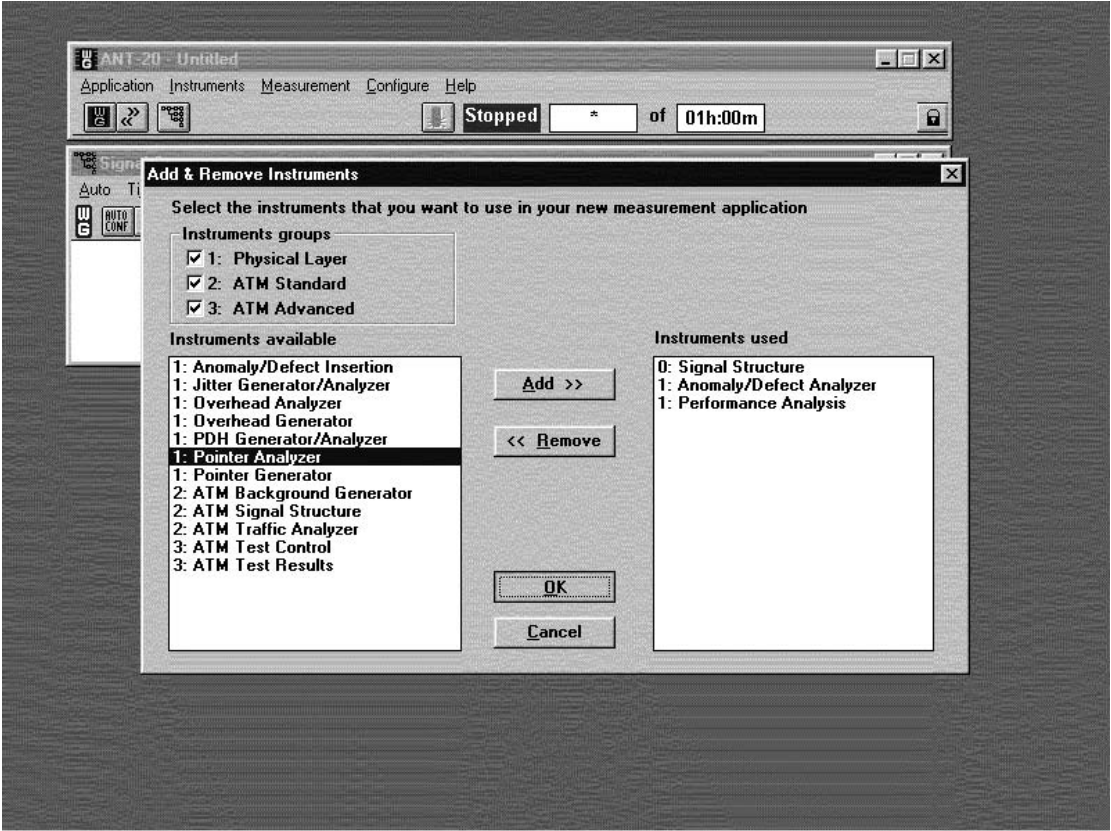


图 11-21 Add&Remove Instruments 对话框

第二步：选择 Signal Structure, Anomaly/Defect Analyzer, Performance Analysis 到右边 Instruments Used 框中，然后单击“OK”按钮确认，选择后的界面如图 11-22 所示。

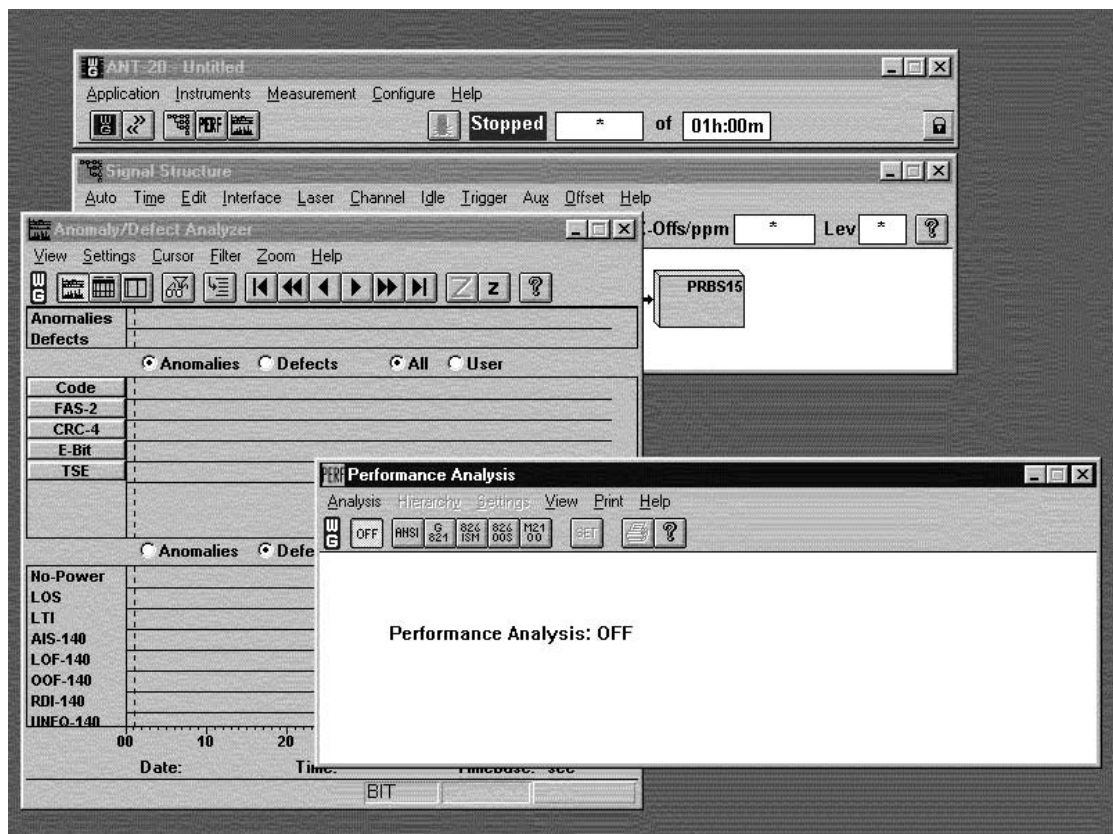


图 11-22 Instruments Used 框

第三步：在 Signal Structure 中编辑测试接口的速率，以下给出几个典型的编辑过程。

2 Mb/s 的 PDH 速率：选择“TX”按钮，单击“Clear”按钮，在 PDH 框中选择 2 M，并选择成帧或不成帧以及测试图案，按 TX=>RX 键，使发端和收端一致。

155 Mb/s 的 SDH 速率：选择“TX”按钮，单击“Clear”按钮，在 SDH 框中选择 STM-1，在 Interface 框中选择 Electric（电口）或 Optical（光口）管理单元选择 AU4，在 Mapping 框中选择 VC12，在 PDH 框中选择 2 M，并在 PDHMode 框中选择成帧或不成帧，以及在 Settings 框中选择映射为 Async，2 M 帧结构类型，测试图案长度。

第四步：将 Anomaly/Defect Analyzer 调到前台，可在 View 菜单中选择观察模式，该虚仪表提供了三种观察模式：直方图、表格、统计方式。显示区域划分成两部分，用于分别显示 Anomaly（异常）和 Defect（缺陷）。在显示的参数中用户可以选择 All 或 User，选中 User 时表明用户通过 Filter 菜单选择自己感兴趣的参数进行观察，在 Setting 菜单中可选择比特或块。显示结果参见图 11-23。

第五步：在做差错测试时，可同时完成性能分析的评估，此时，将 Performance Analysis 调到前台。评估所采用的 ITU-T 建议，可从 Analysis 菜单中选择，也可直接选择相应的按钮，针对不同的建议，Setting 菜单中可完成不同参数的设置。在做性能评估时，可从 Hierarchy 菜单中选择评估对象，评估的结果会以 Accepted 或 Rejected 方式给出，评估显示结果如图 11-24 所示。

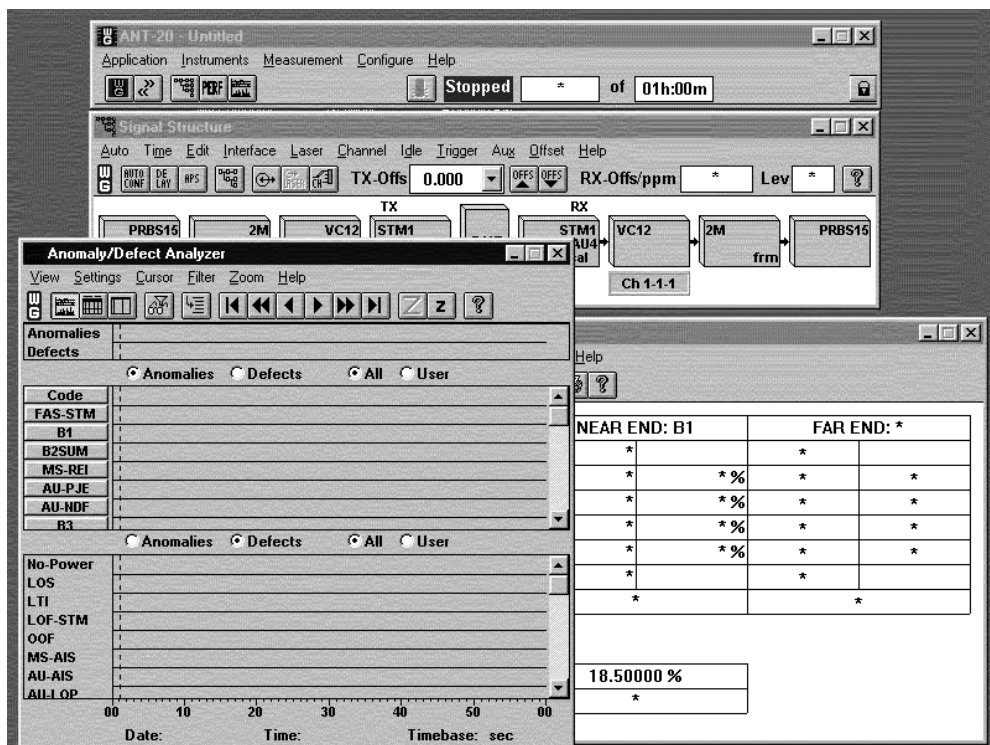


图 11-23 Anomaly/Defect Analyzer 调用图

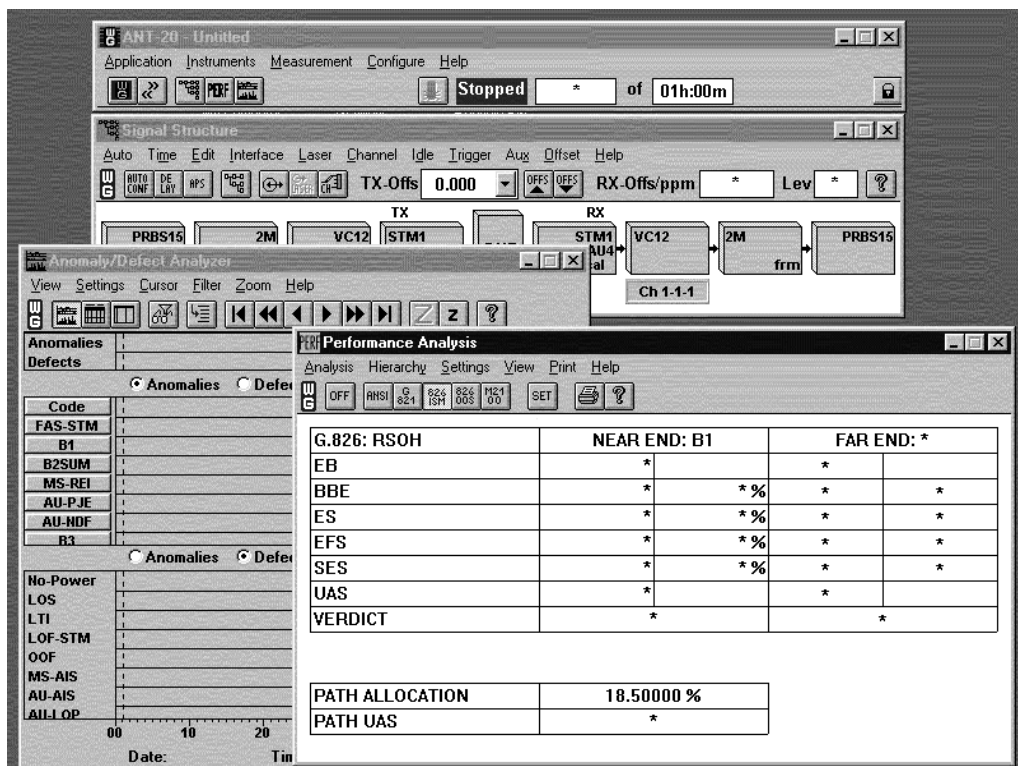


图 11-24 评估显示图

第六步：当做完了所有的设置之后，可以通过 F5 热键启动测试，按 F6 热键停止测试。也可通过 Application 虚仪表中的 Measurement 菜单中的 Start 和 Stop 来启动和停止测试。

2) 抖动漂移测试

输出抖动测试连接如图 11-25 所示。

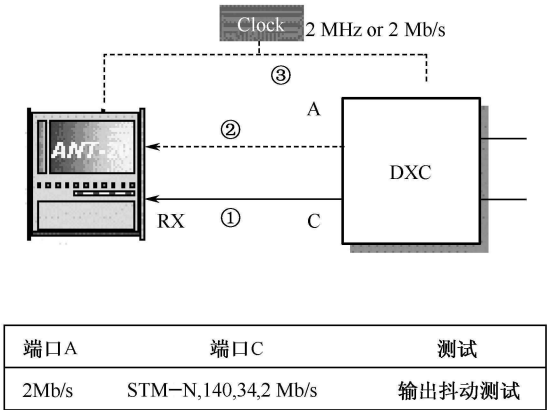


图 11-25 测试连接示意图

有 3 种方式来提供定时、选择 Signal Structure 虚仪表中的 Interface 选项弹出的对话框如图 11-26 所示。

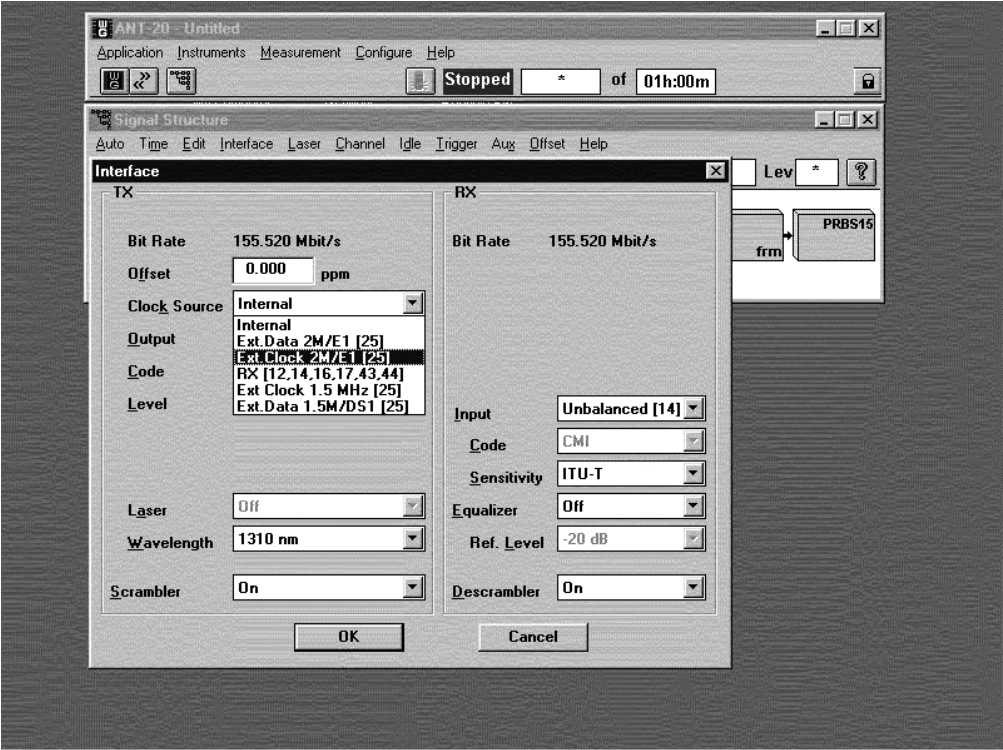


图 11-26 Interface 对话框

在 Clock Source 中选择：RX（从线路中提取时钟）或 External（外部时钟），外时钟有 2 种方式：2 Mb/s，或 2 MHz。

在连接①中，选择 RX，此时仪表从线路中提取时钟；

在连接②中，选择外时钟，此时仪表的时钟由设备的时钟输出来供给；

在连接③中，也选择外时钟，此时，设备和仪表都使用外部时钟源。

在抖动和漂移的测试中，除了要使用 Application 虚仪表和 Signal Smucture 虚仪表外，还要添加 Jitter Generator / Analyzer 虚仪表，该虚仪表如图 11-27 所示。

测试端口速率设置如前所述，在测试输出抖动时选择“PP_RMS”按钮，该界面中提供了 TX，RX 两部分，TX 部分用于选择发送端抖动调制信号的幅值和频率，当按下“TXON”按钮时，将在仪表发端施加抖动，在不需要时，“TXON”按钮应弹起。在 RX 部分提供了测试范围选择和测试滤波器选择，小的测试范围会使测试精度提高，测试滤波器的选择应符合 ITU-T 规定的滤波器，当设置完毕后，按 F5 键启动测试，结果会以抖动峰峰值的最大值和瞬时值形式显示出来，同时给出正峰和负峰的最大值和瞬时值以及 RMS 均方根值。选择“PP_PH”按钮时，过相的计数也在结果中给出，过相的门限在“SET”按钮中设定，默认值为 +0.5UI 和 -0.5UI。测试的结果有两种显示方式，表格式和图形式，显示结果方式通过 View 菜单来选择，图形方式显示如图 11-28 所示。可通过光标操作达到任一测试时刻的抖动值。

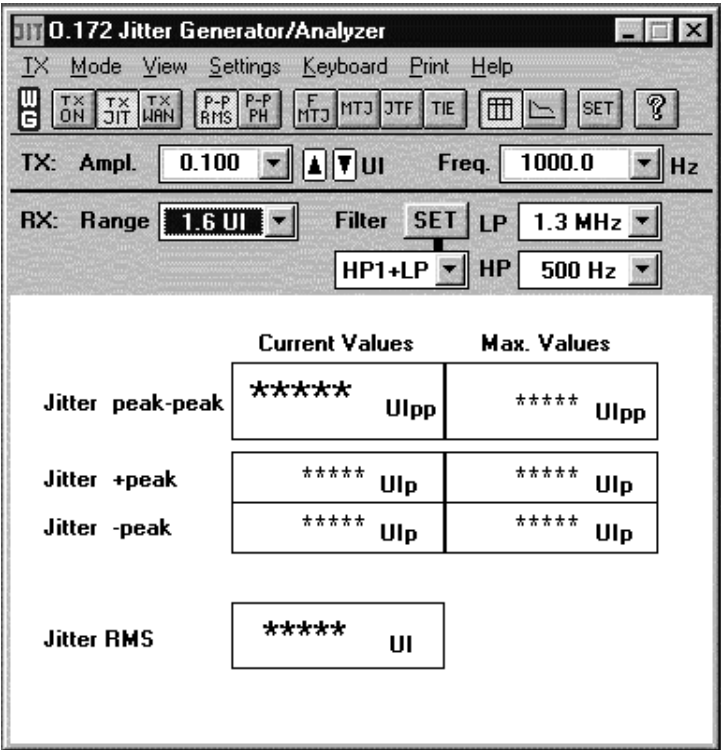


图 11-27 Jitter Generator/Analyzer 虚仪表框图

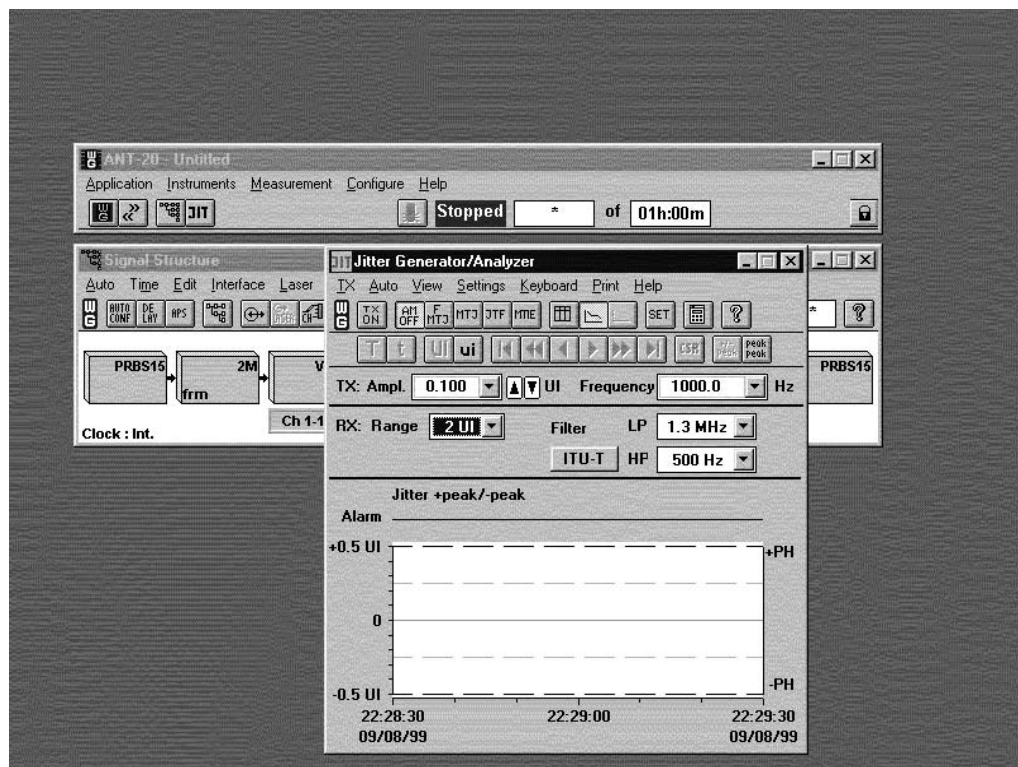


图 11-28 图形方式结果显示图

3) 抖动/漂移容限

测试连接如图 11-29 所示。

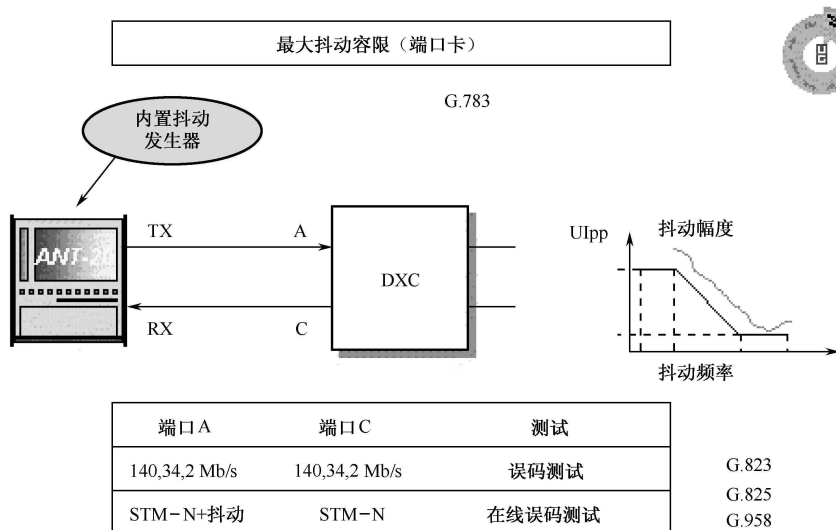


图 11-29 测试连接示意图

在 Jitter Generator/Analyzer 虚仪表中选择“MTJ”按钮，在该界面下有“Start”按钮和“Stop”按钮，通过单击“Start”按钮即可开始进行输入抖动/漂移容限的测试，测

试结果也有两种显示方式：表格式和图形式，测试设置有 3 个，ErrorSource：设定判断参数，Threshold：设定判断门限，Settling time：设置恢复时间，图 11-30 所示为测试的结果样例。

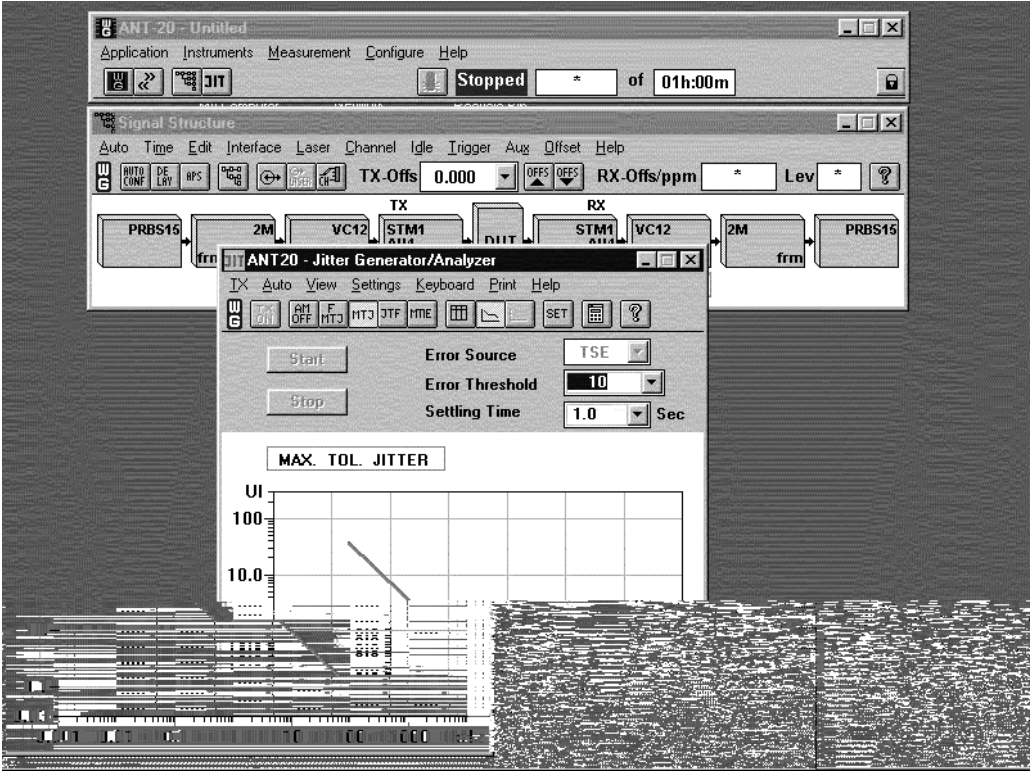


图 11-30 测试结果样例

4) 映射抖动

测试连接如图 11-31 所示。

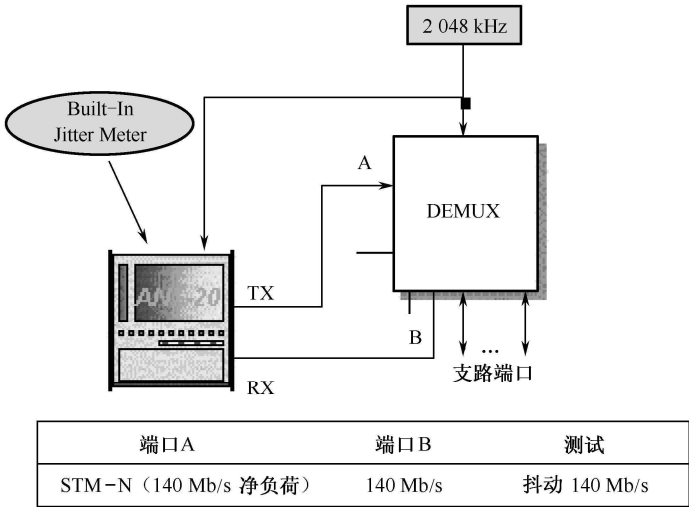


图 11-31 测试连接示意图

在 TX 端，端口速率为 SDH 信号速率，RX 端为 PDH 速率，在测试中，仪表和设备同步，此时，仪表不能选用内时钟，也不能从接收端提取时钟，而应选择使用外时钟，外时钟可由单独的时钟单元来供给。

在进行映射抖动测试时，总共要使用 4 个虚仪表：

Application（应用）虚仪表；

Signal Structure（信号结构）虚仪表；

Jitter Generator/Analyse（抖动发生/分析）虚仪表；

PDH Generator/Analyser（PDH 发生/分析）虚仪表。

在 Jitter Generator/Analyzer 虚仪表中，选择 AMOFF 按钮，并选择适当的测试范围和测试滤波器，在 PDH Generator/Analyzer 虚仪表中，对发送信号施加一定的频偏，如图 11-32 所示。

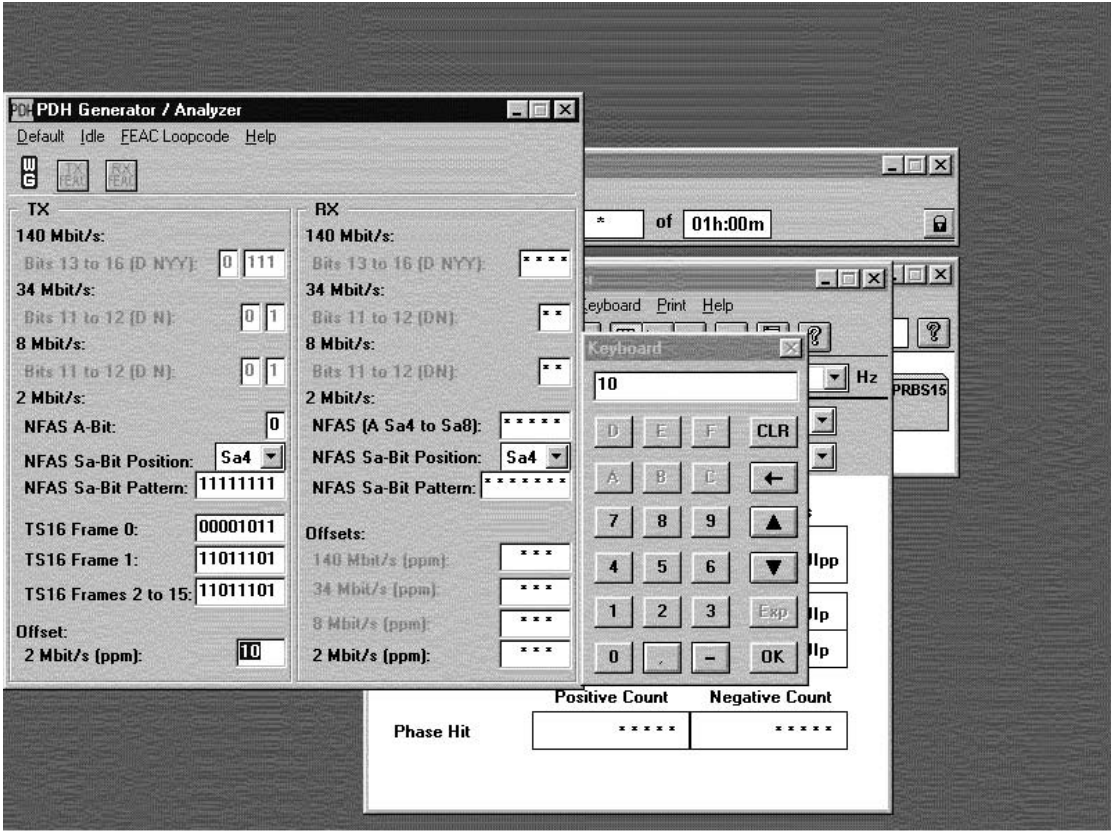


图 11-32 Jitter Generator/Analyzer 虚仪表使用

这时可以启动测试，测试过程中可不断改变频偏，测试的结果在 Jitter Generator/Analyzer 虚仪表中观察。

结合抖动的测试连接方法如图 11-33 所示。

测试结合抖动不仅需要映射抖动的 4 个虚仪表，还需要添加另一个虚仪表，即 Pointer Generator（指针发生），如图 11-34 所示。在测试结合抖动时需要 STN-N 信号施加两种影响：

在 STM-N 净荷上加频偏；
在 STM-N 上施加指针调整。

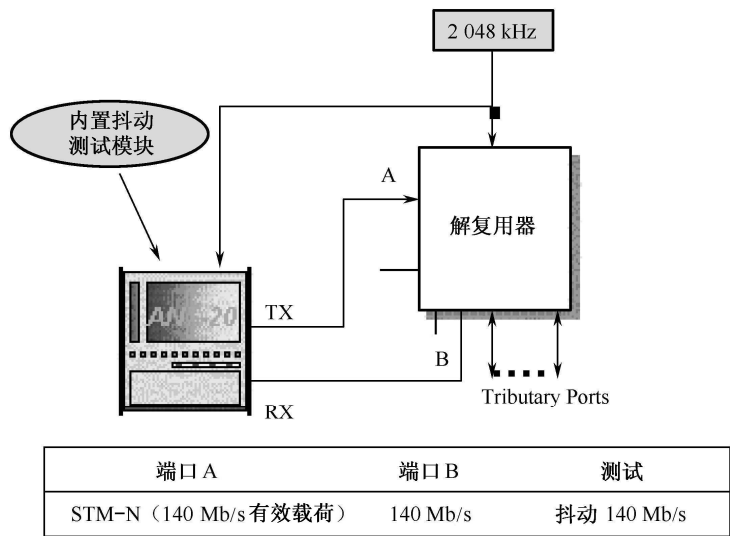


图 11-33 测试连接示意图

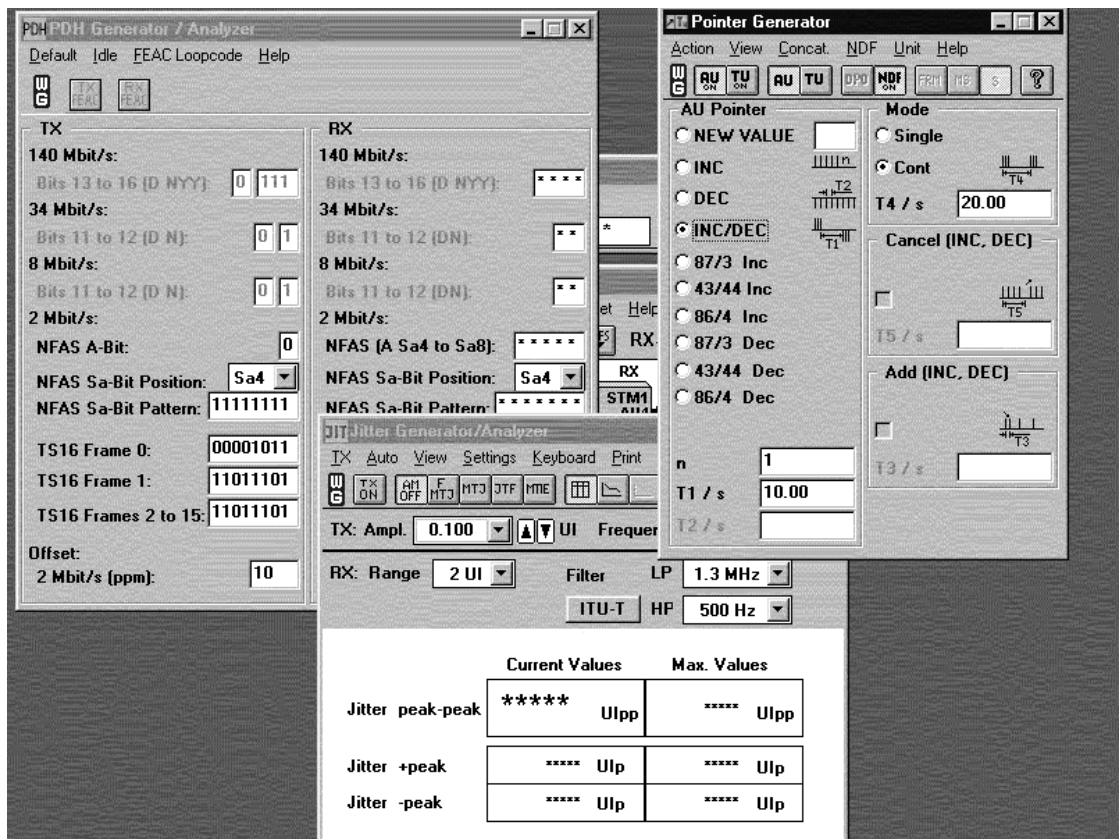


图 11-34 Pointer Generator 虚仪表使用示意图

指针序列的选择可在 Pointer Generator 中进行，用户先选定指针类型（AU 指针或 TU 指针），然后可以选定一个标准的 ITU-T 指针序列，也可以自己定义序列，各序列的定义由值 n，T1，T2，T3，T4 和 T5 等时间来决定。各序列的施加通过“AUON”按钮或“TUON”按钮来进行，“AUON”按钮表示指针序列施加在 AU 指针上，“TUON”按钮表示指针序列施加在 TU 指针上，AU 和 TU 指针还可以同时按下，使 AU 指针序列和 TU 指针序列同时施加。测试结果的观察也在 Jitter Generator /Analyser 中进行，选择“AM OFF”按钮即可。

5) 抖动/漂移转移函数测试

该测试对象针对的是再生器，其连接方法如图 11-35 所示。

该参数的测试通过 Jitter Generator/Analyser 中的 JTF 按钮进行，该参数的观察也有两种方式：表格式和图形式。和 MTJ 一样，在图形方式下，测试结果是否合格会通过模板的对比显示出来，如图 11-36 所示。

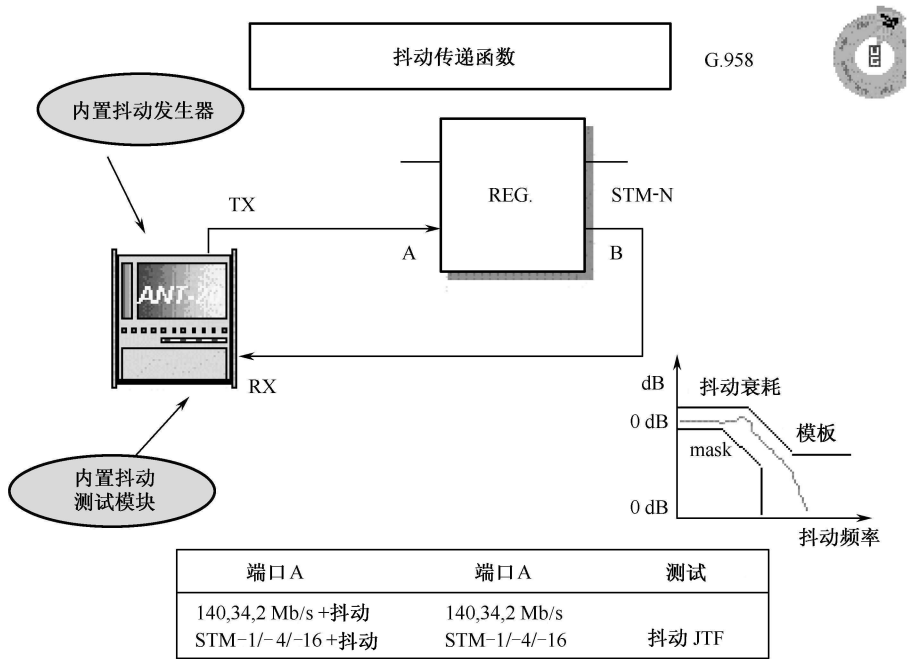


图 11-35 测试连接示意图

在测试 JTF 之前，需要对仪表校准，校准时会出现提示，要求把仪表的 TX 端和 RX 端连接起来，校准完毕，将再生器接入链路，单击“Start”按钮开始测试。

6) 指针测试

测试连接示意图如图 11-37 所示。

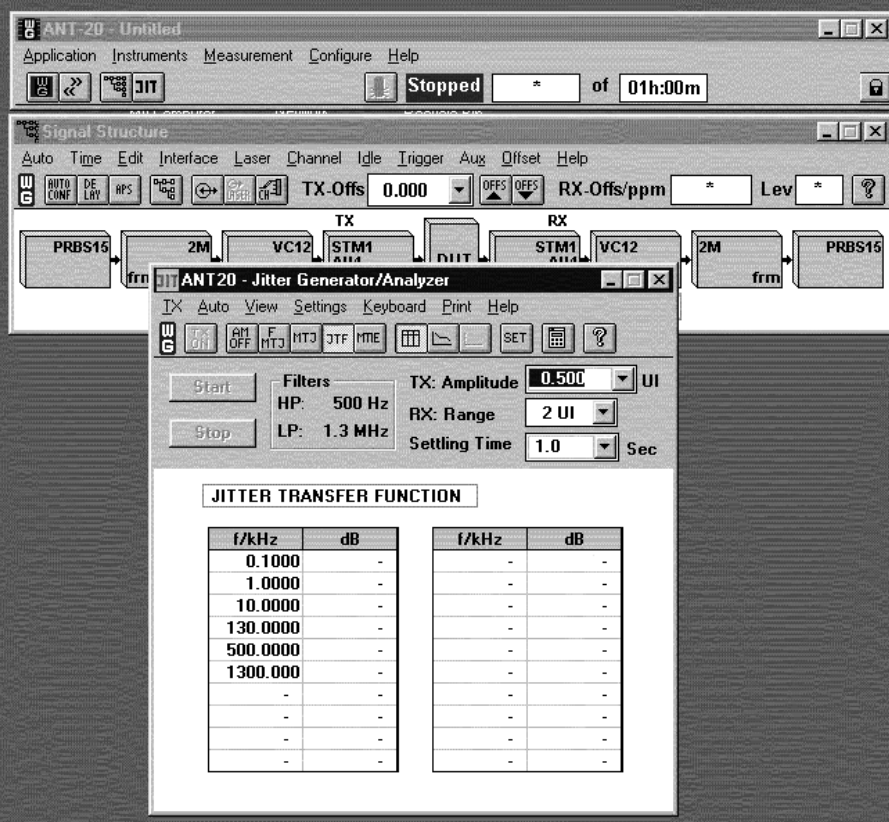


图 11-36 测试结果显示

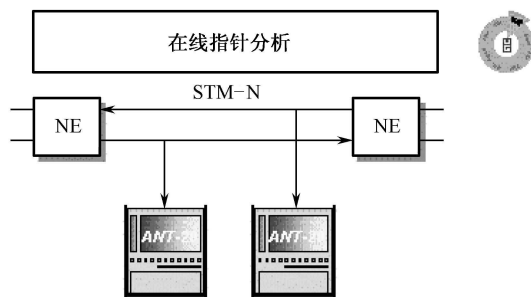


图 11-37 测试连接示意图

在进行指针测试时需使用 Pointer Analyser 虚仪表，如图 11-38 所示。在该虚仪表中有两部分，上端有以数字形式显示的 AU 和 TU 值，下端是以图形方式显示的指针随时时间变化的曲线和指针每次调整的数值，在菜单中或按钮中选择 AU 或 TU，图形显示区域将显示相应的指针。测试完毕后，可用光标移动按钮移动光标，以显示任一时刻的指针值，同时，还可对时间轴进行放大和缩小，按 F5 键开始测试，按 F6 键停止测试。

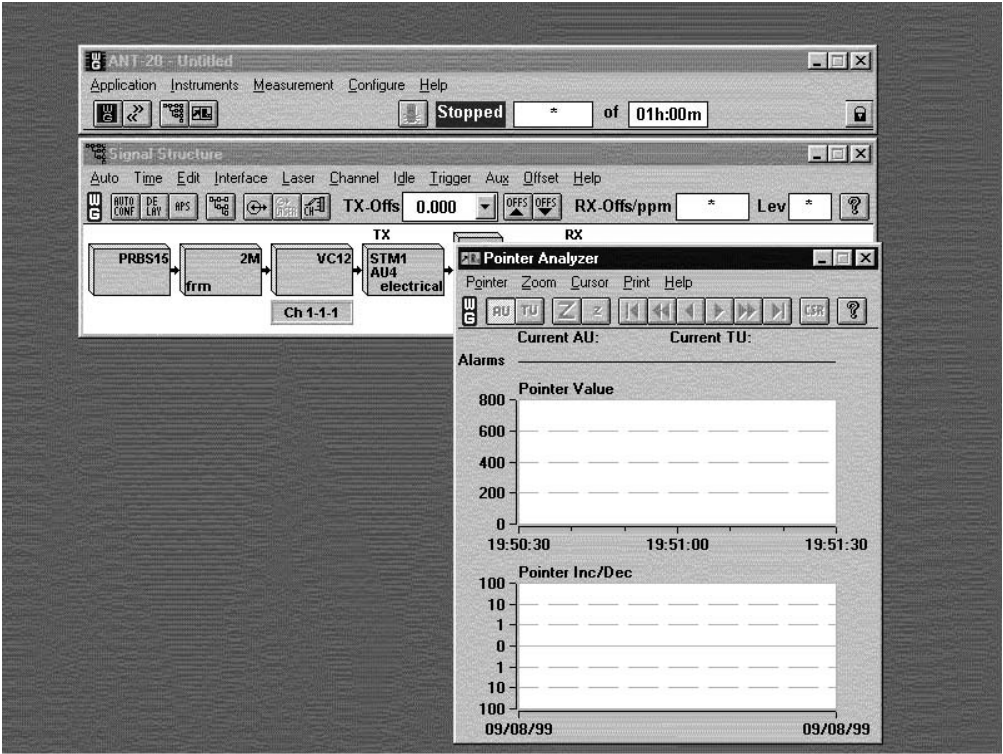


图 11-38 Pointer Analyzer 虚仪表使用示意图

7) 开销测试

测试开销时的在线连接方法与指针测试在线连接方法相同，连线方式如图 11-39 所示。

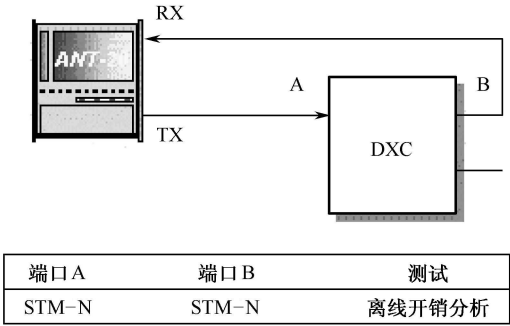


图 11-39 测试连接示意图

所使用的虚仪表为 Overhead Analyzer 和 Overhead Generator，其使用示意图如图 11-40 所示。针对不同的字节，用不同的方式进行处理。

- (1) 所有的字节都可以进行单独编辑。
- (2) 所有的字节除了可以进行单独编辑外，还可以填充伪随机序列进行测试，此时，收、发端都应选择“TPB”按钮，另外，还可以人为编辑字节序列，此时，在发端可单击“SQ”按钮，弹出的对话框如图 11-41 所示。

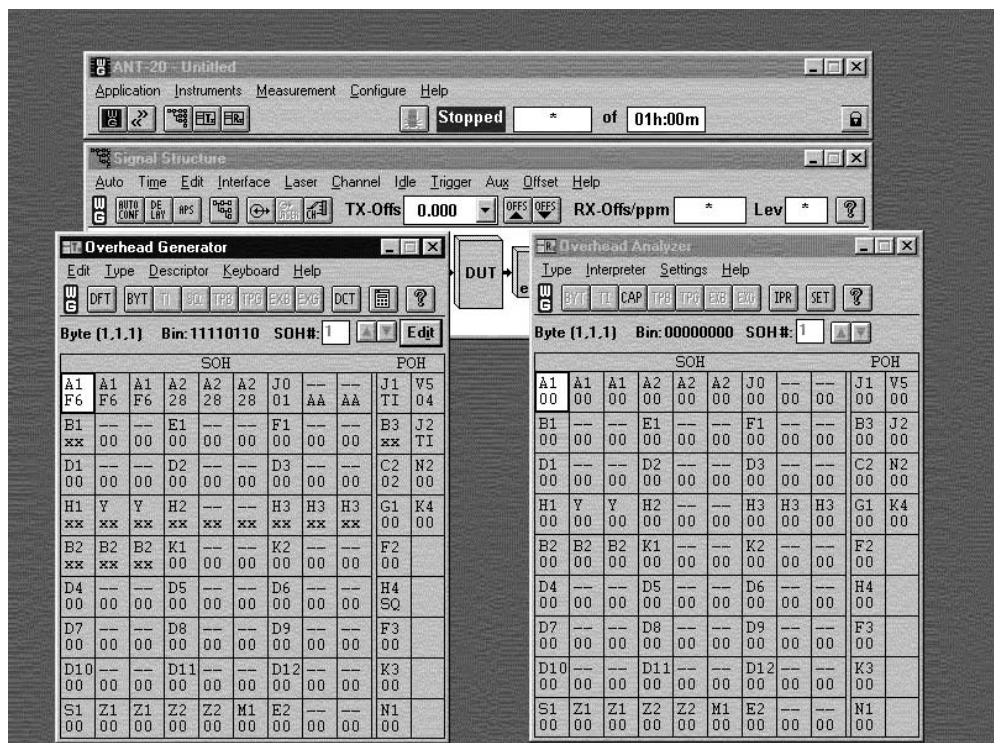


图 11-40 Overhead Analyzer 和 Overhead Generator 使用示意图

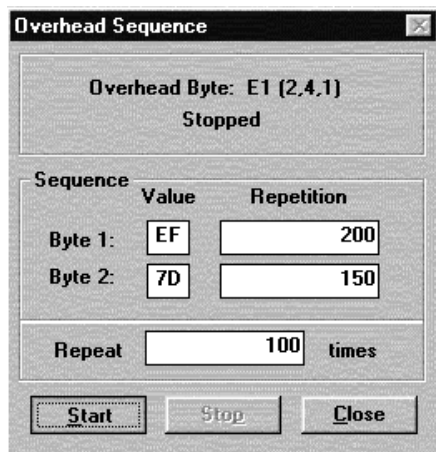


图 11-41 Overhead Sequence 对话框

(3) 对于 J0, J1, J2 字节, 具有通道标志符的捕捉功能和发送功能, 在发端单击 TI 可以编辑 16 字节长的字符串, 作为通道标志符发送, 编辑界面如图 11-42 所示。

选择“OK”按钮确认。在收端, 首先在 SET 功能下, 选中 J0, J1 或 J2 字节(选择“OK”按钮确认)此时各对应字节的 TI 功能使能, 单击 TI 功能, 即可捕捉各对应通道追踪字节的标志符。

(4) 对于 D1~D3, D4~D12 可以使用 TPG 功能, 此时, 伪随机序列填充到联合字节中去, 对于 D1~D3 将填入 3 个字节, 对于 D4~D12 将填入 9 个字节, 用以完成联合

通道的误码功能测试，误码的观察将使用 Anomaly /Defect Analyzer 来评估。

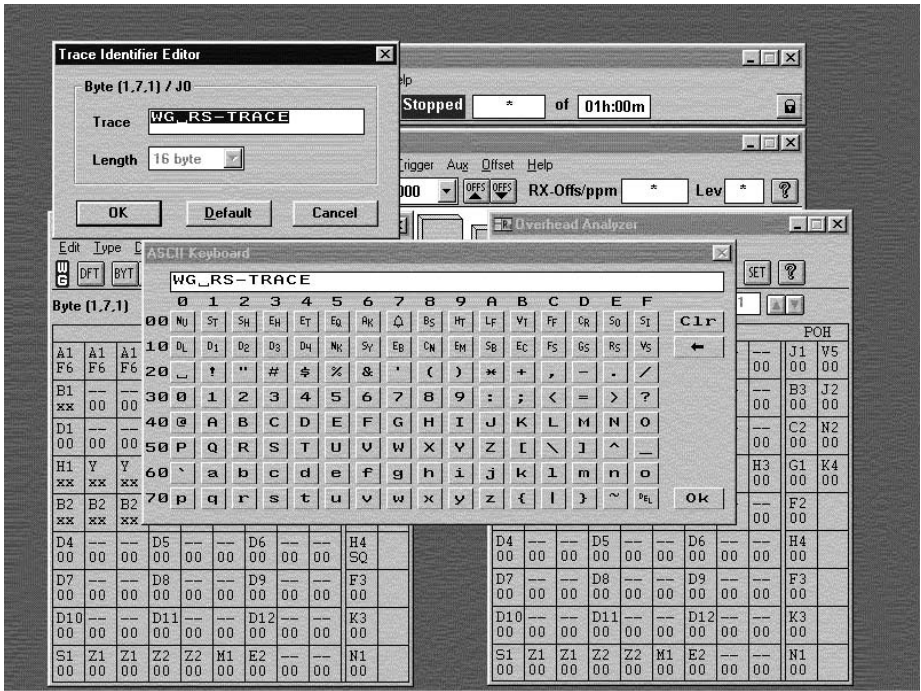


图 11-42 编辑界面

(5) 除此之外，在收端还可对任意字节进行捕获，这一功能尤其适合于 K1, K2 字节和 S1 字节，此时，单击“CAP”按钮，将弹出 Byte Capture 对话框如图 11-43 所示。

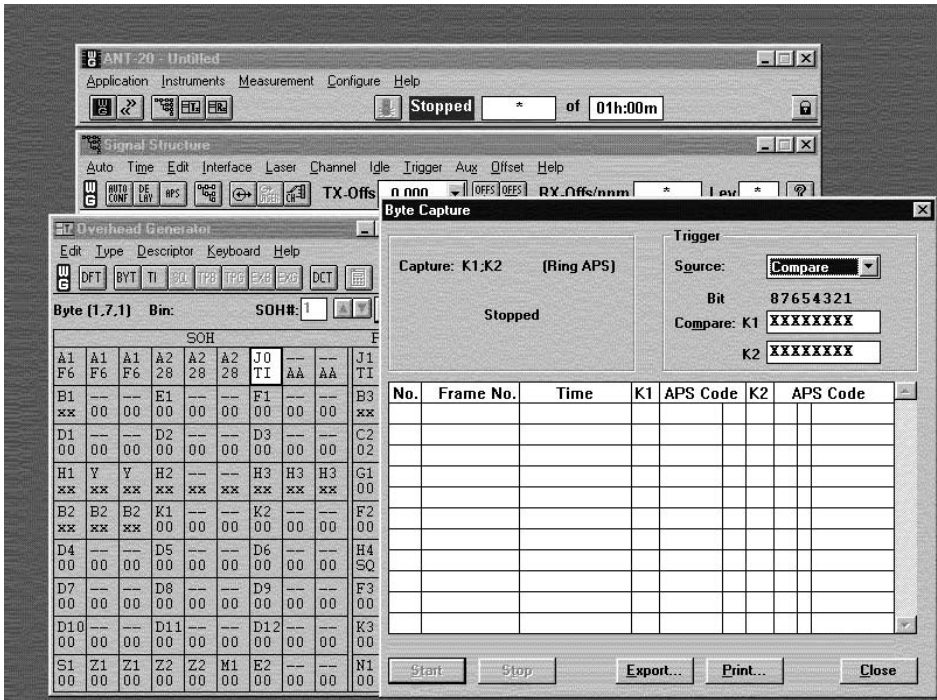


图 11-43 Byte Capture 对话框

此时，先选择捕捉字节的类型，通过 Compare 的下拉框中选择或输入，然后单击“Start”按钮，开始对字节进行捕获，任何符合要求的字节都会被捕获出来，可以对捕获到的字节打印输出进行下一步的分析。

(6) ANT-20SE/ANT-10Gig 支持 TCM (串联连接监视) 功能，单击“TCM”按钮可对各种 TCM 告警和事件进行监测，并可捕获 TCM 标志符，支持 TCM 事件的发生功能，用户可以激发各种 TCM 事件和编辑 TCM 标志符，其分析界面如图 11-44 所示。

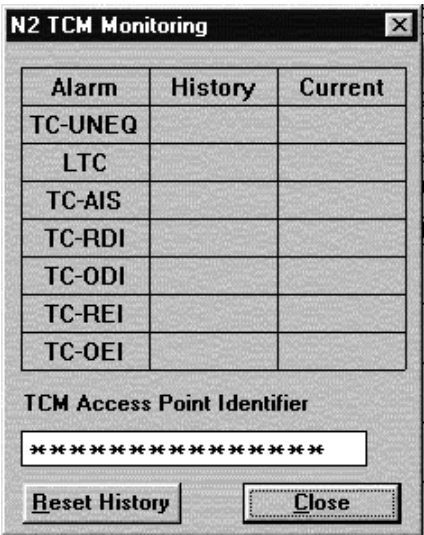


图 11-44 分析界面

8) 速率 (钟频) 测试

在 Signal Structure 的按钮条中有 RX:ppm 的显示，该显示表示出了接收到的信号速率的频偏，通过该相对值，可以得出实际的信号速率。

9) 倒换 (时间) 测试

倒换协议的测试可以通过对 K1, K2, K3, K4 等字节的捕获来完成，测试连接如图 11-45 所示。

(ANT-20E 位置在各备用虚线链路上) 对倒换字节的捕获通过 Overhead Analyzer 进行，单击“CAP”按钮。

对倒换时间的测试，ANT-20E 接在终端，终端接口可以是 PDH 口也可以是 SDH 的 STM-1 口，测试时选择 Signal Structure 的 Time 菜单，选中该菜单中的 APS 项，将弹出 APS 项对话框如图 11-46 所示。

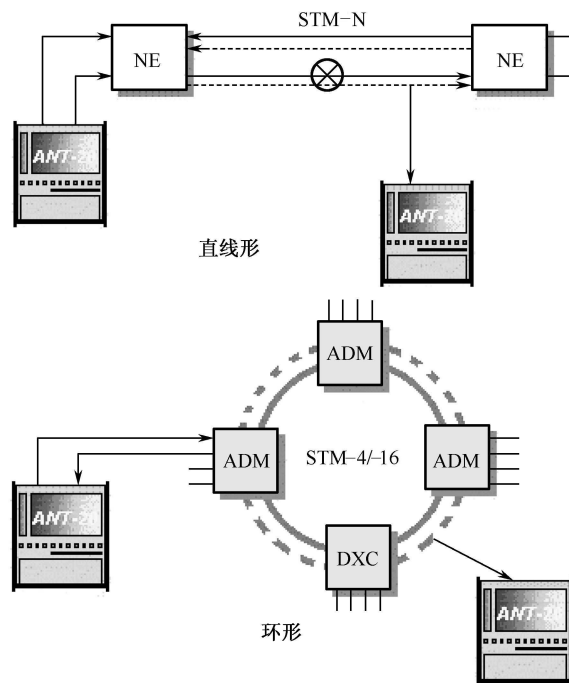


图 11-45 测试连接示意图

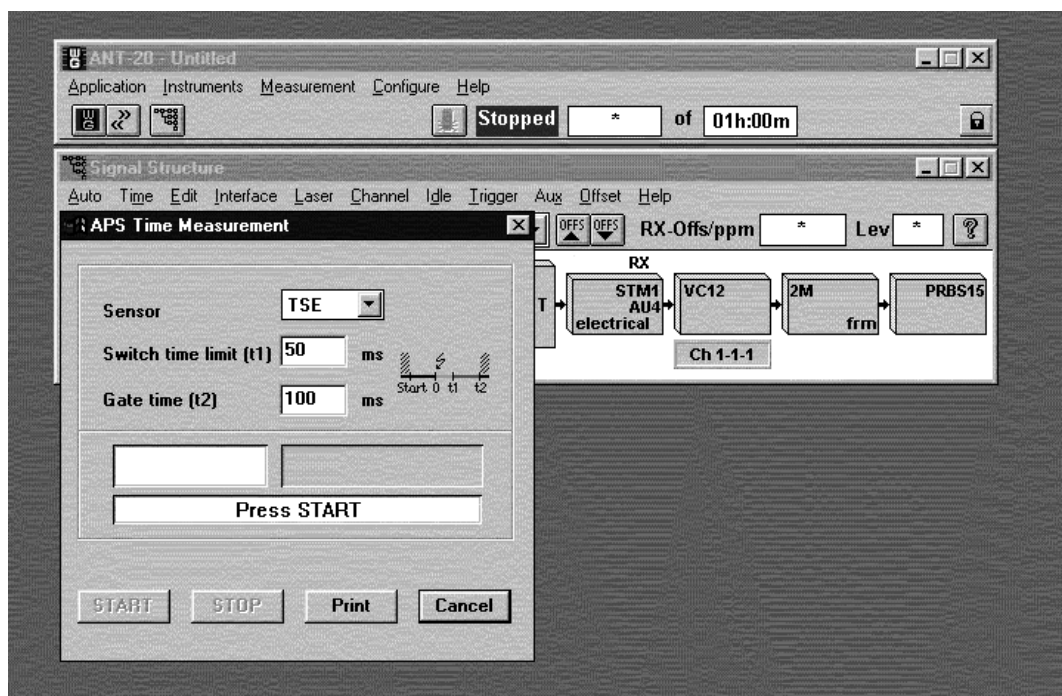


图 11-46 APS 项对话框

单击“Start”按钮，将给出提示，如图 11-47 所示。

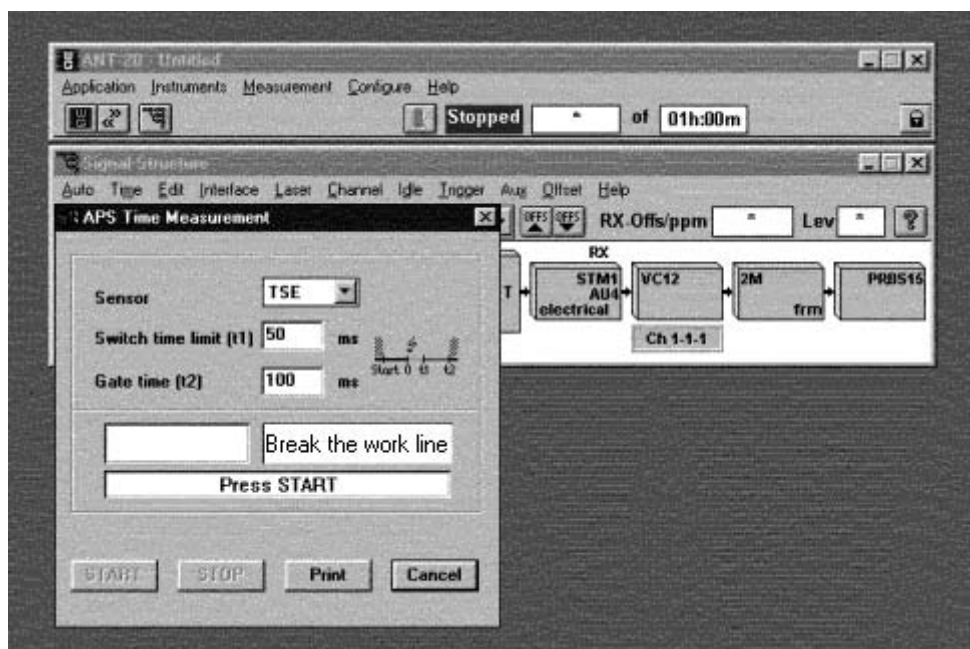


图 11-47 APS 项对话框（给出提示）

按提示断掉主用光纤，此时，将测出倒换时间如图 11-48 所示。

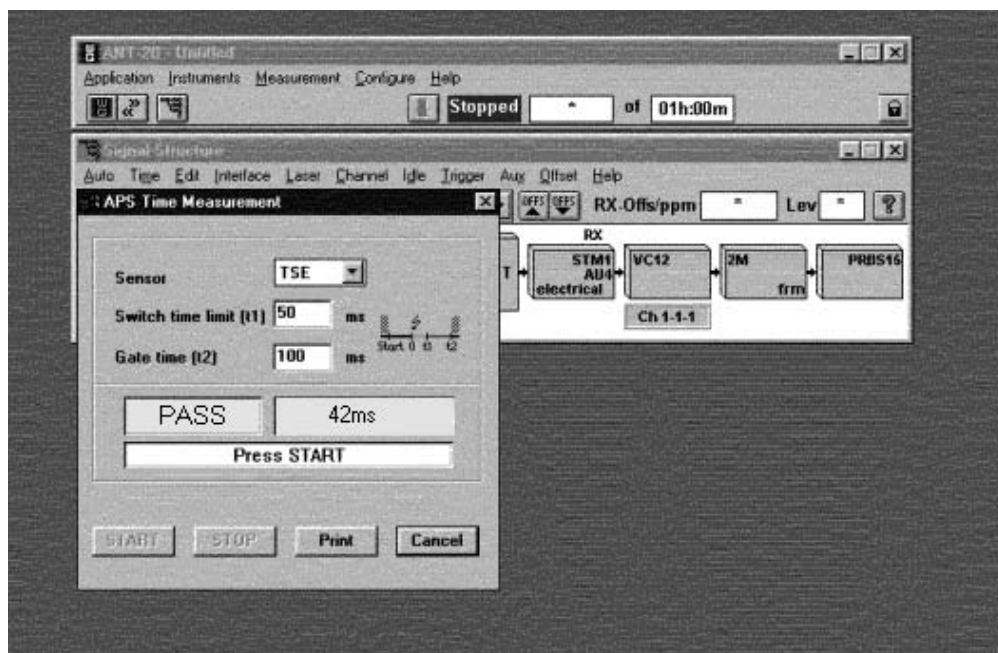


图 11-48 APS 项对话框（测出倒换时间）

10) 在线测试

在电口上在线测试须做两个地方的设置：

(1) 在 Signal Structure 的 Interface 菜单中有 Sensitivity 项目，该项目中有两个选择：

ITU-T 和 PMP，在线测试时选择 PMP。

(2) 在 Signal Structure 的 Edit 菜单下 RX 的 TestPatter 中，应选择 Traffic（业务）项目。

在光口上在线监测时应选用分光器进行，连接如图 11-49 所示。

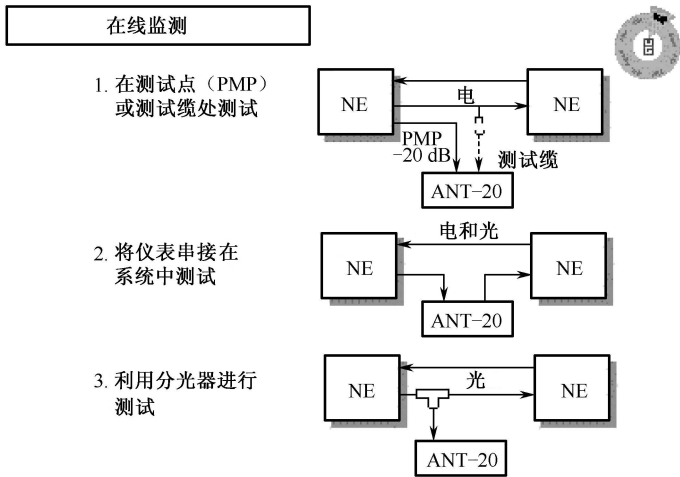


图 11-49 测试连接示意图

11) 测试结果打印

各个虚仪表中都有自己的打印菜单，可以定制，编辑用户的打印风格，编辑框示意图如图 11-50 所示。

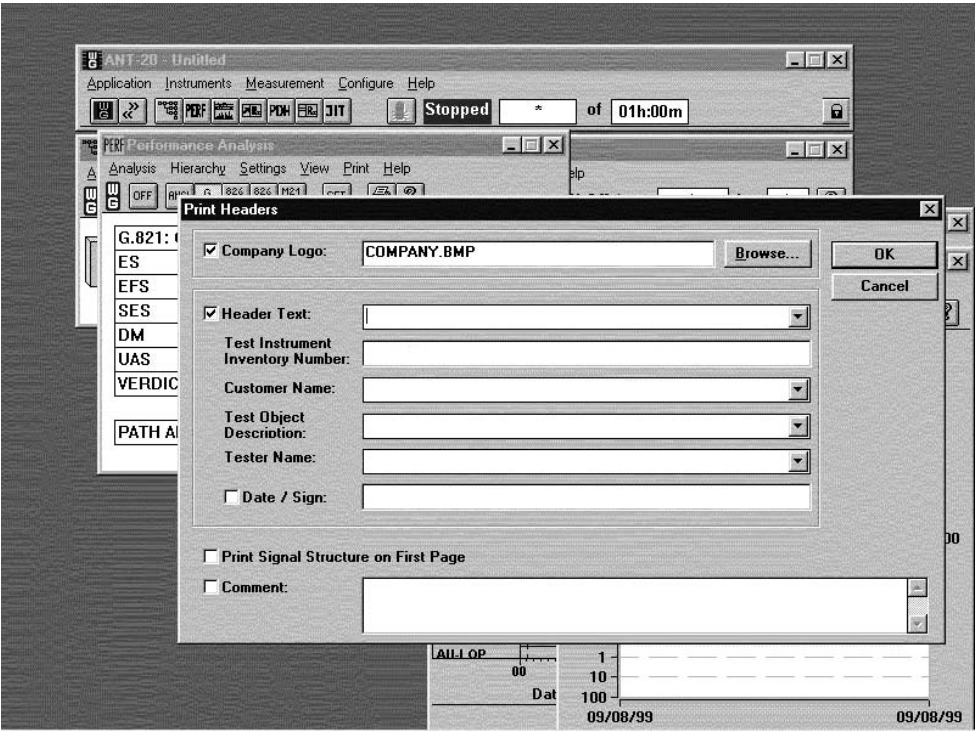


图 11-50 编辑框示意图

打印机的安装通过 Windows 系统来完成，ANT-20SE/ANT-10Gig 在硬盘上做了 Windows 安装盘的备份，各种打印机的驱动程序都能找到。

12) 操作使用注意事项

- (1) 在 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 的光口上不能直接自环，否则会损坏仪表光接收端口；
- (2) 光口自环时，光纤中需加衰耗器；
- (3) 不能用眼睛直视光口输出，以免损伤眼睛；
- (4) 硬盘在旋转时，尽量不要搬运仪表，否则会损坏硬盘。

11.3 SGT—4B 型光功率计

SGT—4B 型光功率计系列产品主要用于连续光信号功率的测量。采用单片机微处理器进行控制，功能齐全。广泛适用于光缆施工与维护、光纤通信、光纤传感器、光纤 CATV 等领域。

SGT—4B 型光功率计条列机身造型设计符合人体工程学要求，采用先进冷塑模工艺，美观耐用。光功率计采用内藏式探测器，可使其受到良好保护。所有按键采用新型薄膜开关，简便、可靠，适合多种使用环境。

1. 技术指标

特性如下：

- 四位液晶显示，W，W（REL），dBm，dB（REL）四种显示方式；
- 自动量程转换；
- 自动关机；
- 自动清零；
- 多波长测量；
- 电池不足告警。

技术指标如下：

- 输入接口：FC 型；
- 工作波长：1 300 nm，1 310 nm，1 480 nm，1 550 nm；
- 测量范围：-70~+10 dBm；0.1 nW~10 mW；
- 测量精度：±5%（±0.2dB）；
- 分辨率：0.01 dBm（dBm），0.1%~1%（W）；
- 供电电源：9 V，150 mAH 充电电池，充电器；
- 使用温度：0~40℃；
- 最大外形尺寸：170 mm×80 mm×30 mm；
- 重量：≤0.28 kg。

2. 操作指南

1) 充电器的使用方法

为保证仪表处于正常工作状态，仪表电源（包括电池及充电器）的状态至关重要。充电器不能用于除自身设计目的以外的其他任何用途，也绝不能采用其他非配套类型的充电器代替对仪表充电，这样会造成仪表不可恢复性的损坏。

当电池不足显示出现时，对仪表充电，方法是将充电器插入电网，而将充电器插头插入仪表电源插孔，这时充电器上指示灯会亮，若指示灯未发光则检查插头是否接触不良。注意充电时须在仪表关机状态下，连续充电 10~14 h。

仪表附有专用充电电池，要及时充电，以免影响仪表的使用。若换用其他类型电池，不可再用充电器充电，以免造成仪表出现不可恢复性的损坏。

2) 按键操作说明

(1) 仪表面板各部分的功能，如表 11-2 所示。

表 11-2 仪表面板功能

序号	名 称	功 能
1	探头帽	拧下探头帽，露出探测器，测量完毕，应拧上此帽
2	液晶显示屏	显示测量结果，测量状态
3	电 源	电源开关键，按此键可接通或断开仪表电源。接通电源，仪表先被初始化，随后进入测量状态
4	清 除	自动清零键，自动清零完毕，则进入测量状态。在清零过程中，应盖好探测器帽，防止光信号输入，否则会引起测量结果的错误
5	WATT	按此键使仪表以 WATT 为单位显示测量结果，此时分辨率为 0.1%~1%
6	dBm	按此键使仪表以 dBm 为单位显示测量结果，此时分辨率为 0.01 dBm
7	dBrel	按此键使仪表进入相对测量状态。当前测量值显示在液晶屏左下方，相对值显示在液晶屏中间，小字符 REL 做为相对测量的状态标志显示在液晶屏下方。在相对测量的状态下，按 WATT, dBm 键可使测量结果分别以 WATT 或 dBm 方式显示。第二次按此键，则退出相对测量状态
8	λ	此键用于选择仪表的测量波长。在测量状态下，被测波长显示在液晶屏下方。按此键，显示的波长和测量结果随之改变，如仪表的测量波长为 1 300 nm, 1 310 nm, 1 480 nm, 1 550 nm
9	充电插孔	充电器插头由此插入，对电池充电

(2) 操作流程图（功能键），如图 11-51 所示。

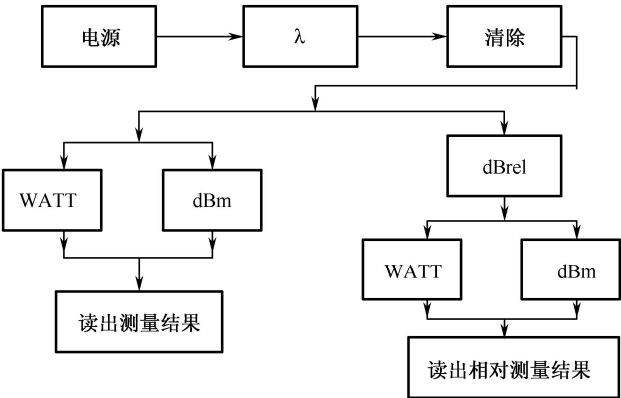


图 11-51 操作流程图

3) 测量说明

(1) 供电电源。仪表可由内装充电电池直接供电。当充电电池供电不足时，可重新充电后再使用，随机所配充电器可作为电源使用。

(2) 开机。按面板电源键后，仪表首先将液晶屏上的全部字符，小标志显示出来，此过程持续约一秒钟。仪表随后进入测量状态。显示测量波长，WATT 显示模式下为直接测量方式。

(3) 清零。在测量前必须按清除键对仪表清零。如不清零，仪表对微弱光信号的测量结果会有误差。

4) 按键操作及液晶显示

(1) 清除键。在正式测量前，应先清零，否则测量微弱光信号时有误差。在按清除键之前应用探头帽盖住探头，避免光进入。

(2) WATT 键。使显示以 WATT 为单位。

(3) dBm 键。使显示以 dBm 为单位。

(4) dBrel 键。使仪表进入相对测量状态。

(5) λ 键。改变测量波长，可选择四种波长：1 300 nm，1 310 nm，1 480 nm，1 550 nm。

(6) 电池不足显示。仪表供电不足时，液晶屏左上方电池不足标志“BATT”会显示，此时应中止测量，给电池充电后再使用，也可一边充电一边使用。

5) 关机

SGT-4B 开机后，如在 5 min 之内无光信号输入，并且不按面板键，仪表自动关机，也可按电源键手动关机。

3. 维护及故障处理

1) 使用注意事项

(1) 仪表使用温度为 0~40℃，使用时应防潮湿、防灰尘、防震动、防热源（红外光影响）。

(2) 当仪表在低温条件下长时存放或使用后，再放入室温条件下，仪表会发生冷凝，如立即开机使用，会引起短路，损坏仪表，应在室温下放置一段时间后再使用。

(3) 超量程的输入光信号会损坏探测器，不可测量超量程光。

(4) 定期用牙签绕脱脂棉清洗探头内部，并注意用无纤擦拭纸清洁连接器插头端，避免测试不准。

其他故障应与厂家联系，不要自行拆开仪表，以免造成更严重的故障。

2) 注意事项及保养

在使用任何光传输设备时要注意养成一个良好的习惯，如避免用眼睛直接观看光纤或光源，在使用光传输设备时，一定要遵守单位的安全规定。

保持光连接器的表面清洁是十分重要的。擦伤或污垢会降低光连接器的性能，光连接器端口应定期用光器件专用清洗剂或无水工业酒精清洗。

第 12 章 WDM 新技术应用及发展

长距离、大容量、智能化是 WDM 技术的发展方向。目前商用的 WDM 系统针对不同的实际线路,选择不同类型光纤,采用 FEC、AFEC、色散补偿和光均衡等技术。无电中继最大传送距离可以达到 5 000 km,能够做到每波带宽为 10 Gb/s 时,最多可以接入 192 波,每波带宽为 40 Gb/s 时,最多可以接入 80 波的系统传送容量。同时,系统采用了模块化设计思想,接入容量可进行平滑、扩容和升级。

WDM 系统解决了传输距离和传输容量的问题,但是传统的 WDM 技术通常采用的是客户信号直接映射进光通道的方式,只能定位于点对点的应用。业务提供的大部分工作需手工完成,灵活性差,不同厂家业务互通困难,对光层信号的处理仍然停留在模拟通信时期的水平,特别是近年来传送大颗粒宽带业务的需求日趋增长,传统的 WDM 技术已经无法满足网络智能化大颗粒的发展需求。在新的情况下传输领域诞生了一种新的传送技术 OTN,OTN 技术具备了 SDH/SONET 灵活、可靠和 WDM 容量大的优势,解决了高效、智能、可扩展和高可靠的传送需求。

本章介绍 WDM 新技术的应用及发展,首先介绍 WDM 超常距离传输的新技术及研究近况,再简单介绍 OTN 技术的体系架构和特点。

12.1 WDM 超长距离传输的新技术

1. WDM 超长距离传输的主要特点

超长距离光传输技术有着很好的应用需求,其主要特点表现在如下几方面。

1) 提供端到端的业务传送,简化了网络结构

在超长距离光传输技术中,每一对收发设备设置在传输网络中的两点,可提供端到端的业务服务。信号到达目的地之前,一直处于光层,业务传送效率更高,可形成便于骨干网络信息传递的“信息高速公路”或“直达快车”,简化了网络结构,便于实现光网络向智能化方向的顺利演进。

2) 便于运行维护管理,减少系统投资

由于减少了有源器件的使用,超长光传输系统能够减少设备数量,降低机房功耗和减少空间占用。有助于系统稳定,减少系统隐患。极大地方便了对运行设备的维护管理,同时也减少了建设投资。

3) 便于系统升级扩容

骨干传送网络具有较大的预期传送容量,考虑到业务发展通常具有容量从小到大的滚动扩建需求。超长光传送系统能够以模块叠加的方式,实现容量的平滑升级和扩容。很好地解决了建设投资和系统容量的问题。

2. WDM 超长距离传输受限

在光放大器技术未出现之前,传输 SDH 信号时每隔大约 80 km 就需要设置一个电再

生器 REG, 所以要想进行长距离传输如 640 km, 沿线需要设置一系列中继设备。而中继设备是 O/E/O 的变换过程, 成本较高。传输距离越长中继设备需要得越多, 这样大大增加了传送网建设的成本。也就是说, 当时制约长距离传输的主要因素是衰耗受限。

随着宽带业务和互联网的飞速发展与应用, 对光网络的容量和传输距离提出了极大需求, 面对这种挑战, 出现了 WDM 与 EDFA 技术。WDM 具有大容量的优点, EDFA 不仅解决了衰耗受限的难题, 而且成本比较低。因此, 人们只要增加少量的投资就可以基本上解决系统的传输容量与传输距离问题, 即每隔 80~100 km 设一个 EDFA 光放站, 可以把 N 个 2.5 Gb/s 系统的信号光功率放大到原来水平。所以利用 EDFA 技术可以实现大容量 (如 100 Gb/s)、长距离传输 LH (long haul), 如在 WDM 100 Gb/s 系统的标准配置中, 8×22 dB 配置可以使系统的传输距离达到 640 km。

然而, 由于 EDFA 具有 ASE 噪声与较高的噪声系数 (如 6 dB 左右), 过多的 EDFA 级联使用会增加接收端的积累噪声, 使接收端的 OSNR 达不到要求, 即出现了 OSNR 受限; 因此, 只依靠 EDFA 技术不能解决 WDM 100 Gb/s 系统超过 640 km 的传输问题。于是, OSNR 又成为制约超长距离传输的主要因素。

由于光纤喇曼放大器 FRA 与 FEC 技术的出现, 大大缓解了系统的 OSNR 受限问题。FRA 具有极低的噪声系数 (1 dB 左右), 所以分布式喇曼光放大器不仅具有较大的增益, 而且还可以大大提高接收端的 OSNR (4~5 dB); 而采用前向纠错编码 FEC 技术则可以降低接收端的 OSNR 容限 (降低对 OSNR 的要求), 如采用 RS (m, n) 编码就可以获得 3~5 dB 的编码增益, 大大缓解了 OSNR 受限的压力。总之, 结合喇曼放大器与 FEC 技术, 可以实现扩展型的长距离传输 ELH (enhanced long haul) 使 $N \times 10$ G WDM 系统的传输距离达到 640~2 000 km。

光放大器技术只是解决了衰耗受限, 但并未解决系统的色度色散受限问题; 因为光放大器只对光信号进行了功率放大而并未对光脉冲进行整形。因此要想实现 100 G 系统的 ELH 传输, 在使用 FRA 或 FEC 技术解决 OSNR 受限的同时, 还要配合使用色散补偿技术, 因为此时系统已经出现了色度色散受限, 而 $N \times 10$ Gb/s WDM 系统本身就属于色散受限系统, 实际应用时更需要进行色度色散补偿。色散补偿光纤 DCF 是目前广泛使用的成熟色散补偿技术, 利用色散斜率特性与工作光纤完全相反的 DCF, 可以对系统整个波段中的 (如 C 波段) 所有复用通路进行比较理想的色度色散补偿。但 DCF 补偿技术仍然存在一些问题, 如它的色散斜率存在一定误差, 导致在 ELH 或 ULH 传输时各通路在接收端会产生比较大的色散差异, 光纤的色散特性会发生漂移等。所以说色度色散受限一直是制约大容量、长距离传输的重要因素。

对于 $N \times 10$ Gb/s WDM 系统, 还存在着 PMD 受限问题。它是由于光信号在非理想结构的光纤中传输时, 光信号两个正交偏振分量会呈现不同的传播速度, 从而在接收端出现差分群延时 DGD; 传输速率越高、传输距离越长, PMD 的影响越严重。PMD 效应的随机性很强, 目前尚无成熟的 PMD 补偿技术, 所以采取的对策一是根据传输距离对光纤的 PMD 系数提出要求, 二是 DGD 过高时增设 REG, 此外还可以利用 RZ 编码调制技术弱化 PMD 的影响。

要想实现超大容量 (如 400 Gb/s 以上)、距离在 2 000 km 以上的 ULH, 只依靠上述的技术还不够, 不仅是因为所有制约系统传输的受限因素如衰耗、色度色散、接收端 OSNR、PMD 等都快要达到极限状态, 更重要的是, 对系统性能造成劣化而且无法恢复

的非线性效应影响将变得越来越明显。由于系统的传输容量巨大（复用通路数量多）而导致入纤光功率可能过高，过高的光功率输入很容易使光纤产生非线性效应，超长距离的传输还会使非线性现象产生积累，因此非线性效应会大大改变光纤的传输特性，严重劣化系统的性能，必须予以高度重视。有两大类非线性效应即克尔效应与受激散射效应，克尔效应包括自相位调制 SPM、交叉相位调制 XPM 与四波混频效应 FWM，受激散射效应包括受激喇曼散射 SRS 与受激布里渊散射 SBS 效应，它们将导致光信号脉冲波形发生畸变、光功率发生转移以及产生附加噪声等，其中以 SPM 效应最为严重。因此对于非线性效应必须另辟蹊径，如严格控制入纤光功率，采用更新的技术来抑制或弱化非线性效应的影响等，RZ 编码调制技术就是其中之一。

3. WDM 超长距离传输的关键技术

1) 宽带喇曼放大器

利用宽带喇曼放大器可实现光纤固有衰耗的内部补偿。喇曼放大器工作的基本原理是受激喇曼散射（SRS）效应，即将一小部分入射功率由一光束转移到另外一个频率下移的光束，频率下移量由非线性介质的振动模式决定，当波长较短（与信号波长相比）的泵浦光馈入光纤时，发生此类效应。泵浦光光子释放其自身的能量，释放出基于信号光波长的光子，将其能量叠加在信号光上，从而完成对信号光的放大。可以说喇曼放大器是利用光纤自身对信号进行放大处理，光信号在传输过程中的固有衰耗可以在光纤内部得以补偿。

在喇曼放大器应用中较为广泛的是分布式喇曼放大器（DRA）。其喇曼增益取决于泵浦光功率、泵浦光波长和信号光波长之间的波长差值。在超长 WDM 光传输系统中，喇曼放大器技术是非常受瞩目的光传输技术，利用喇曼放大器可以提高系统的 OSNR、增加系统跨距长度、提高 WDM 系统的通路数和抑制光纤非线性效应，同时还可以放大掺饵光纤放大器（EDFA）所不能放大的波段。

2) 动态色散补偿技术

色散是影响光纤通信传输的距离的重要因素之一。例如，普通单模光纤（SMF），它在 1 550 nm 窗口的色散系数约为 17 ps/(nm·km)，传输 100 km 后色散可达到 1 700 ps/nm，而对于 10 Gb/s 的系统，它的最大色散容限是 1 000 ps/nm 可见，要延长信号传输距离必须进行色散补偿。

当前，国际上对色散补偿的研究较多，已经提出的色散补偿方案有：啁啾光纤光栅（CFG）、色散补偿光纤（DCF）、基于 G-T 标准干涉技术、基于 MEMS（微电子机械系统）技术、PLC 环行共振腔技术等。这些技术各有优缺点，据统计，目前色散补偿器中利用色散补偿光纤（DCF）技术的占 89%，利用啁啾光纤光栅（CFG）和基于 G-T 标准干涉等技术的模块占 11%。但随着 40 Gb/s DWDM 的成熟和发展，而要延长传输距离使用动态色散补偿技术是系统的必然。虽说目前大量使用的色散补偿光纤（DCF）技术能够对各个波长进行补偿，但它单一固定的补偿值不能满足对所有波长色散的精确控制，不能实现 100% 的斜率补偿。同时 DCF 的插损也是比较大。由于 DCF 技术这些固有的缺陷，今后能够实现动态补偿技术的模块应用将呈上升趋势，预计 2009 年后 DCF 技术将占 26%，光栅、体光学干涉等模块将占 74%。基于体光学干涉的色散补偿方法，核心元

件为 G-T 干涉仪, 具有全方面的色散补偿能力。基于 MEMS 及 PLC 环行共振腔技术的动态色散补偿器集成度高, 并可加入其他功能, 前景十分看好。随着首个全光子 2R 再生器在美国光纤通信会议 OFC 2004 上的亮相, 相信基于各种新技术和工艺的动态色散补偿器将会不断涌现。

3) 超强前向纠错编码技术

前向纠错 (FEC) 是指信号在被传输之前按一定的格式对其进行预先处理, 在接收端则按规定的算法进行解码以达到找出错码并纠错的目的。在光传输系统中采用 FEC 技术, 能够消除系统性能曲线中的误码率平台现象, 其编码增益也为系统提供了一定的富余量, 从而降低光链路中线性及非线性因素对系统性能的影响, 同时对于有光放大器的系统, 可以增加光放大器间隔, 延长传输距离, 提高信道速率, 减小单通路光功率。

FEC 分为带内 FEC 和带外 FEC。所谓带外 FEC, 是指在 SDH 层下面另外增加一个 FEC 层, 专门用于 FEC 的处理。这种方式要进行码速调整, 增加了线路码率, 从而提高了系统的成本和复杂性。带内 FEC 是指将监督码元映射到 SDH 帧结构中的开销字节中, 即利用未使用的开销字节传送 FEC 的校验位, 显然, 这种方法避免了码速调整, 系统的成本提高不多。但这种方法的译码延时比带外编码的稍大, 并占用了部分开销, 同时由于校验位可获得的带宽受限, 从而使其纠错性能受到一定影响。通常带内 FEC 编码技术的增益一般为 3 dB 左右, 而带外 FEC 的增益远高于带内, 一般可达到 5~6 dB。ITU-T G.975/G.709 标准支持带外 FEC, 同时带外 FEC 编码冗余度大, 纠错能力强, 编码增益高, 并且可方便地插入 FEC 冗余码而不受 SDH 帧格式的限制, 具有较强的灵活性。因此, WDM 超长距离传输系统均采用带外 FEC 编码技术。

4) 性能优越的传输码型

在超宽频带的超长距离 WDM 传输系统中, 使用 NRZ, RZ 等码型在改善光信号的传输性能方面都有自己突出的一面。NRZ 码的应用简单、成本低、频谱效率高, 是目前 SDH 和 WDM 系统中应用最为广泛的码型。但由于 NRZ 码元过渡不归零, 对传输损伤敏感, 不适用于高速超长距离光信号的传输。RZ 码的主要缺点是信号频谱宽度相对 NRZ 码增加, 增加调制器使系统变得复杂、成本高。为了进一步提高 RZ 码的传输性能, 近年来还出现了 CS-RZ (载频抑制 RZ) 和 CRZ (啁啾 RZ) 等码型。在 CS-RZ 码中, 相邻码元电场振幅的符号相反, 从而达到降低光谱宽度的目的, 在功率较高的情况下, 不但增加了色散容限, 而且有更强的抵抗 SPM 和 FWM 等光纤非线性效应的能力。CRZ 码采用了三级调制技术 (RZ 幅度调制、相位调制和数据调制), 其相位调制器在发射端在 RZ 脉冲的上升沿和下降沿加入一定的啁啾量, 抵抗非线性效应的能力非常优异。此外, CRZ 还具有优良的抵抗偏振相关损耗 (PDL) 和偏振模色散 (PMD) 的能力, 具有更高的传输稳定性。它的缺点是调制技术比较复杂, 对三级调制之间的定时和时延要求很高。

信号调制格式是实现大容量 WDM 系统传输的一项重要技术。目前部分超长距离的 10 G/s 的 WDM 系统已采用了 RZ 编码。40 Gb/s 的 WDM 系统由于非线性效应及色散 (包括 PMD) 等变为突出矛盾, 在调制方式的选择上目前仍没有达成统一论。采用 RZ 编码已经被业界认为是解决问题的重要技术, 而 RZ 编码中的 CRZ 方式具有脉冲压缩能力,

能容忍更高的 PMD 值，可以缓解信号在光纤中的非线性交互作用等优异特点，其越来越成为了业内关注的重点。

5) 动态增益均衡

在 WDM 超长距离传输中，保证整个线路上的增益平坦是非常重要的。在设备的主光通道的入口各个波长之间的功率电平可能一样，但由于放大器增益平坦度以及各个波长在线路中衰减不一致，会导致在接收端各个波长之间的功率差异较大，影响正常的接收。目前一种通用的方法是在各个光放站放置增益平坦滤波器，用于保证线路上各个波长之间的增益平坦，此外通过基于各个通道光谱密度的大小，实施反馈控制，从而完成对增益平坦度的动态管理。

应用动态增益均衡的优势，可以增加 WDM 超长距传输系统的区段数目，可以在级联 50 个 EDFA 的情况下，不进行电再生中继；在传输系统动态网络配置中，可以减少网络波长数目发生时造成对系统 OSNR 的损伤。同时利用动态增益均衡来减少因系统输入光功率变化而造成的增益斜度劣化，可以代替目前正在使用的可调光衰减器。

6) 新型光纤技术

光纤是最主要的传输媒质，其性能对光信号的传输质量影响最大，可以说上述各种关键技术都是针对光纤特性对信号的影响展开的，所以设计和采用特性优良的光纤是提高传输性能最有效的手段。

对于超长距离光传输，理想的光纤特性应该是具有很小的衰减系数、平坦的响应光谱、适当的色散、较大的有效面积、很低的 PMD、理想的弯曲特性、存在可做色散补偿的色散互逆单元等。实际中光纤很难同时满足这些要求，但总可以满足部分要求以期望改善信号的传输质量。例如，非零色散位移光纤能够提供适当色散，既减小色散本身的影响，又利用一定的色散克服光纤非线性的影响，并保持原 G.652 光纤的大部分好的特性。减小色散斜率的非零色散位移光纤克服了通常非零色散位移光纤色散斜率较大的缺点，能够与 DCF 更好地匹配；大有效面积非零色散位移光纤能提供较大的有效面积以减小光纤非线性的影响；水峰消除光纤消除了 1380 nm 处的 OH⁻吸收峰以提供更宽的光谱范围，这些新型光纤为超长距离光传输铺平了道路。

目前的传输试验，采用传统光纤为传输介质，40 Gb/s 最大传输距离约 2 500 km，而所有 3 000 km 以上传输系统都采用新型光纤。实践证明采用新型光纤确实能比传统光纤取得更好的传输性能。

下面分别介绍全波光纤、低色散大有效面积光纤、低色散斜率光纤的发展情况。

(1) 全波光纤。历史上 1 350~1 450 nm 波长范围内未被使用，原因是 OH⁻负离子的影响造成的衰减远远高于相邻的区域，这是由光纤制造过程中残留的 OH⁻负离子杂质带来的影响。该离子的吸收峰大约在 1 385 nm 附近。

全波光纤除了没有“水峰”外，其他特性与色散非位移光纤完全一样。全波光纤能够采用与普通光纤同样的办法切割和与连接器相连，并与现有的传输系统完全兼容。

通过增大约 100 nm 的光谱带宽（1 350~1 450 nm 波长区域），全波光纤能够容纳大约 125 个新的波长（间隔为 100 GHz）。光纤在这些波长上的衰减比 1 310 nm 处小，并且这些波长上的群速度色散只有色散非位移光纤在 1 550 nm 波长区域色散的一半。网络管理的改善可以通过为不同的服务提供最合适的波长带宽来实现。

最后全波光纤获得的额外的光谱带宽能够允许使用较为便宜的激光器、复用器、解复用器和上下波长的器件。通过增加密集波分复用信道的间隔，直接调制激光器可以替代较为昂贵的外调制激光器（特别在较短波长上）。

(2) 负色散大有效面积光纤超高速系统的主要限制在于色散和非线性。为了克服四波混频效应的影响，在工作波长区域需要保持一定的群速度色散。虽然正负色散对于克服四波混频效应作用相同，但负色散能够克服调制时的不稳定现象，由于非线性效应和色散的相互作用而产生的另外一种非线性效应。受调制信号在具有正色散特性的光纤中传输时，调制不稳定性（modulation instability, MI）会以尖峰信号的形式表现出来。尖峰信号起源于非线性自相位调制现象。自相位调制能够造成光脉冲后沿的波长比脉冲前沿短。在具有正色散的光纤中，短波长的信号比长波长的信号传输速度快。当后沿赶上前沿时，产生干扰，并在传输的脉冲上产生一个尖峰。尖峰不是噪声而是原来信号光脉冲的一部分。在海底光纤通信系统中，当再生距离达到 10 000 km，调制不稳定的作用就变得明显了。具有负色散特性的光纤能够克服这个潜在的问题。除了负色散特性以外，负色散大有效面积光纤比绝大多数光纤具有更大的有效面积。将光功率分散到更大的面积上减小了光纤中的光功率强度，由此提高了非线性功率门限，因此允许更高的光功率射入光纤中，从而使光放大器的间隔距离变得更大。采用负色散大有效面积光纤能更好地满足海底光纤通信系统的要求。

(3) 低色散斜率光纤。随着技术的不断发展，光放大器能够允许传输系统工作在 1 600 nm 波长附近的第四波长窗 L1（1 565~1 625 nm）。为实现这一需求，光纤的色散必须满足：

- 足够大，能够克服光纤的非线性效应；
- 足够小，需要的色散补偿最小；
- 在较宽的波长范围内色散值相对保持常数。

其中，最后一项要求色散斜率小，这是为了满足用户倾向于使用更宽的波长范围而提出的新的努力方向。色散斜率用来衡量光纤的色散随着波长变化的程度。针对不同应用而设计的光纤会在色散斜率上有较大的不同，即使它们具有相同的零色散波长。当光纤用于长途传输系统时，色散斜率的作用会变得相当可观。位于工作波长区域两端信道（例如在 C 波段的 1 530 nm 和 1 565 nm 处）和位于波长区域中间信道的色散值差随着距离的增加而增加。

减小色散斜率有两个主要的好处，是无须增加长波长的色散就能够改善短波长的性能，并且降低了在 C 波段和 L 波段色散补偿的成本和复杂度。对于具有高色散斜率的非零色散光纤，在短波长 1 530 nm 附近色散太小，在长波长 1 635 nm 附近色散太大，必须在这之间做出折衷的考虑。这种较低的色散对短波长的功率（即传输距离）的限制，取决于所使用的传输设备（功率电平、信道间隔以及其他因素）。

现代长途光纤通信系统工作在第三波长窗口（C 波段），将来的系统工作在第四波长窗口（L 波段）。在这些区域低色散斜率光纤的色散可以克服四波混频效应和交叉相位调制，同时能够防止脉冲扭曲过度而需要使用昂贵的色散补偿器件。

对光纤特性的不同要求取决于光纤用于何种网络。海底光缆网传输的距离最长，为了满足系统的高可靠性，在网络中使用了大量昂贵的光放大器。具有负色散特性和大有效面积的光纤减少了对昂贵的光放大器的需求，因此能够大量节约成本。陆地长途光缆

网采用非零色散光纤和每个信道速率为 10 Gb/s 的方案已被公认为每比特成本最低的传输方式。这一点已经在大量铺设的非零色散光纤的光缆中得到证实，在美国陆地长途光缆网中，超过半数的光缆采用该种光纤。小色散斜率光纤，在第三波长窗口具有较高的性能，并且适用于新兴的第四波长窗口。城域网可以从一根光纤中容纳尽可能多的波长中受益。通过减少与衰耗相关联的 OH^- 负离子，全波光纤能够容纳比普通色散非位移光纤多 40% 的波长。

全光网络的不同应用，海底通信系统、陆地长途通信系统以及城域网，能够通过不同的新型光纤解决方案来实现。针对不同的场合采用相匹配的光纤类型已经能够在光纤中将 1Tb/s 的信号传输超过 400 km。最终，每根光纤有可能以上述速度的 50 倍传输信号。

7) 遥泵技术

远程泵浦光放大器 (remote optically pumped amplifier, ROPA) 简称遥泵光放大器，主要应用于无中继系统中，用来提高系统功率预算，延长系统传输距离。目前 ROPA 技术已在无中继海底光缆系统中被广泛使用，中继器的使用明显增加了费用。同时泵浦波长的 1 450~1 490 nm 波长范围内输出功率达数瓦的激光器已商用，这也使得 ROPA 系统更具吸引力。另外，ROPA 与 RA 相比，ROPA 可使跨损提高 15 dB 左右，而 RA 一般提高 6 dB 左右，所以 ROPA 的使用可允许跨距上有更大程度的扩展。同时，在系统中将 ROPA 与 RA 结合起来使用，可最大限度地延长传输距离，提高系统功率预算。

经过几年的努力，国内外各主要设备制造商对超长距离 WDM 系统的研究基本上完成了试验系统的研究和搭建。相关研究成果已经逐步进入商用化阶段。WDM 超长距离传输系统可以减少电再生站、光放站的数量和延伸光放站之间的距离，大大降低了超长距离传输系统的建设成本。伴随着各类宽带业务的蓬勃发展，各用户在通信容量方面的要求越来越高，目前以 10 Gb/s 为主流的单通道速率已经远远不能满足用户的需求，市场对 40 Gb/s 大容量的需求指日可待。在光缆骨干网核心层的建设中，对波长的需求将逐步增加。从网络结构上看，我国的光缆网络是以北京为中心，业务向各省会城市辐射的核心层结构，传输距离大多超过上千公里，超长距离的宽带快速直达业务将逐年增加，建设超宽超长的 WDM 系统势在必行。

4. $N \times 40\text{Gb/s}$ WDM 系统进展

$N \times 40\text{Gb/s}$ WDM 系统面临许多挑战或者说在其传输方面出现了众多难题，因为速率越高，传输方面的难题就越多，越大，这些难题主要包括以下几个方面。

1) 衰耗方面

40 Gb/s 系统的接收机灵敏度非常低，理论上比 100 b/s 系统低 6 dB (受器件、制造工艺等方面的影响，实际的灵敏度还要低)。目前采用 PIN 光二极管的 400 b/s 系统接收灵敏度仅有 -8 dBm 左右，而用于 40 Gb/s 系统的 APD 光二极管尚未问世，所以系统的传输距离只有 20 km 左右。

综上所述，衰耗受限已经不是系统受限的难题，因为出现了高增益的光放大器尤其是 EDFA，但需要注意的是，过多的 EDFA 级联会引发 OSNR 受限问题。

2) 色度色散方面

众所周知，系统的色度色散容限与传输速率的平方成反比，所以 $N \times 40\text{ Gb/s}$ WDM

系统的色度色散容限比 $N \times 10 \text{ Gb/s}$ 的 WDM 系统降低了 16 倍。

采用外调制的 40 Gb/s 系统的色度色散容限不足 100 ps/nm , 使用 G.652 光纤传输时, 色度色散受限传输距离不足 5 km , 根本不能满足实际需要, 所以必须进行色度色散补偿。

目前 WDM 系统的色度色散补偿通常采用 DCF, 虽然这是一种相当成熟的色散补偿技术, 但由于它不能实现对 WDM 系统每个复用通路的精确补偿, 所以当使用较多的 DCF 时易造成接收端复用通路累积的色散量差异过大, 影响边缘通路性能。

总之, 色度色散受限是 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统面临的重要挑战, 利用 ODB, DPSK, DQPSK 技术可以获得高色散容限。

3) PMD 方面

PMD 受限传输距离与传输速率的平方反比, 所以 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统的 PMD 受限传输距离为 $N \times 10 \text{ Gb/s}$ WDM 系统的 $1/16$ 。

如目前质量比较好的 PMD 系数为 $0.2 \text{ ps} \sqrt{\text{km}}$ 的光纤, 它传输 $N \times 10 \text{ Gb/s}$ WDM 系统的 PMD 受限距离为 $2\,500 \text{ km}$, 而它传输 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统的 PMD 受限距离仅为 156 km 。换言之, 要想使 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统传输距离达到 $2\,500 \text{ km}$, 要求光纤的 PMD 系数 $\leq 0.05 \text{ ps} \sqrt{\text{km}}$, 这是一个要求非常高的指标。所以 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统对光纤的 PMD 系数与光缆的外部使用环境提出了更苛刻的要求。采用 RZ 码型调制技术可以弱化 PMD 的影响, 如 CS-RZ, DPSK, DQPSK 技术。

4) OSNR 方面

OSNR 容限要求比 $N \times 10 \text{ Gb/s}$ WDM 系统增加了 6 dB , 以 NRZ 码为例, OSNR 容限变为 32 dB 。如此高的 OSNR 要求, 对于 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统则是一个极大的挑战, 必须综合使用克服 OSNR 受限的各种技术, 才可能实现系统的长距离传输。如使用低噪声的喇曼光纤放大器 FRA、前向纠错技术 FEC 与 AFEC, 以及 DPSK, DQPSK 等 RZ 编码调制技术。

5) 非线性效应方面

如上所述, 过高的入纤光功率与小的码元间隔会导致比较严重的非线性效应, 导致 WDM 系统出现非线性失真, 对于 $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统尤其如此。

采用先进的 RZ 编码调制技术可以对非线性效应进行适当的抑制, 如 DPSK, DQPSK 技术。

总之, $N \times 40 \text{ Gb/s}$ WDM 系统具有许多巨大的优点和潜在的应用优势, 但由于其传输速率过高, 也面临着许多挑战, 主要表现在色散容限、OSNR 与非线性效应方面, 这些难题正在逐步得到解决, 系统正在逐步得到应用。

目前, 华为公司生产的 Optix BWS 1600 Gb/s 骨干 DMDM 光传输系统, 应用可靠的光复用/解复用技术、掺铒光纤 (EDFA) 光放大技术、Raman 放大技术、信道均衡技术、SuperWDM 技术、ROADM 技术、C 波段扩展、色散补偿技术、统一网管技术等新技术, 能够做到接入 192 波, 每波 10 Gb/s 速率业务; 80 波接入, 每波接入 40 Gb/s 的传输能力。同时, 系统采用了模块化设计思想, 接入容量可进行平滑扩容。既能实现 40 波—80 波—120 波—160 波的系统扩容, 也能采用超 C 波段实现扩展 20% 的传输容量, 达到 192 波, 并按波长进行平滑升级, 有利于采用分期投资, 按需建网的思路建设干线传输网络。

12.2 OTN 技术的体系架构和特点

传统 WDM 网络虽然容量大，但是采用的是客户信号直接映射进光通道的方式，只能定位于点对点的应用，业务提供的大部分工作需要手工完成，灵活性差，无法满足网络智能化的发展要求；不同厂家业务适配的实现方法不尽相同，互通困难；同时目前对光层信号的处理仍然停留在模拟通信时期的水平，对光信号缺乏行之有效的监控措施，光信号层还不能提供可与电信号层媲美的 OAM&P 能力。

大颗粒宽带业务传送需求的日趋增长，需要一种高效、可扩展、可靠的传送网解决方案。

OTN 就诞生于此种背景下，它包括光层和电层的完整体系结构，对于各层网络都有相应的管理监控机制，光层和电层都具有网络生存性机制。其思想来源于 SDH/SONET（映射、复用、灵活地交叉、嵌入式开销、级联、保护、FEC），把 SDH/SONET 的可运营可管理能力应用到 WDM 系统中，同时具备了 SDH/SONET 的灵活可靠和 WDM 容量大的优势。

1. OTN 标准体系介绍

OTN 概念是 ITU-T 在 1998 年提出的，并陆续完善了近十余个相关标准。从功能和主要特征来讲，最终目标是实现全透明的全光网络。OTN 不仅仅可以通过 WDM 技术将传送容量提高到 Tb/s 甚至十多个 Tb/s 量级，更重要的是可以在光层对信号进行处理，例如光信号的分插复用、光波长转换、光波长交换、光通道的建立/拆除以及提供光波长出租业务等，与传统的 WDM 技术相比发生了质的变化。OTN 相关标准体系如图 12-1 所示。

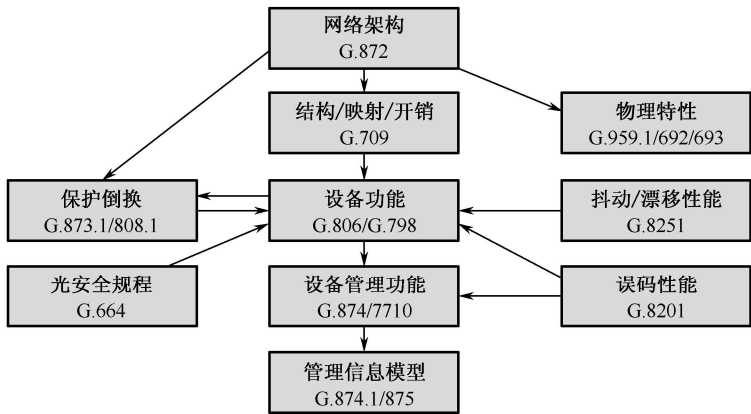


图 12-1 ITU-T 定义的 OTN 相关标准建议

2. OTN 的网络接口

OTN 技术体制定义了两类网络接口：IrDI 和 IaDI。IrDI 接口定位于不同运营商网络之间或同一运营商网络内部不同设备厂商设备之间的互连，具备 3R 功能。而 IaDI 位于同一运营商或设备商网络内部接口。规范 IrDI 和 IaDI 接口的实现是 OTN 标准化的目标，接口之间的逻辑信息格式由 G.709 定义，而光/电物理特性由 G.951.1，G693 等定义。

对于 OSO 的实现没做出定义, G709 中明确 IrDI 接口只是实现无 OSO 的简化功能 OTM 即可。

3. OTN 的分层结构

传输系统可分为光层和客户层, 光层可细分为光信道层 (OCh)、光复用段层 (OMS) 和光传输段层 (OTS)。光信道层又可分为三个电域子层: 光信道净荷单元 (OPU)、光信道数据单元 (ODU) 和光信道传送单元 (OTU)。光传送网分层结构如图 12-2 所示。

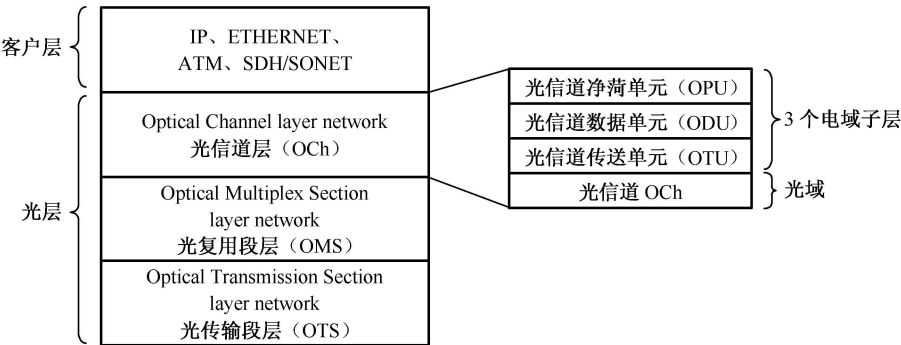


图 12-2 光网络分层结构

OTN 包括信道层和段层。其中 OCh 为信道层, OMSn, OTSn 和 OPSn 为段层。OCh 为整个 OTN 的核心, 是 OTN 的主要功能载体。OCh 由 3 个数字结构单元和 1 个模拟单元组成, 模拟单元就是光信道物理信号, 数字单元包括: OCh 传送单元 OTUk; OCh 数据单元 ODUk; OCh 净荷单元 OPUk。

OTN 技术体制的层次结构和详细的信息流之间的关系如图 12-3 所示。

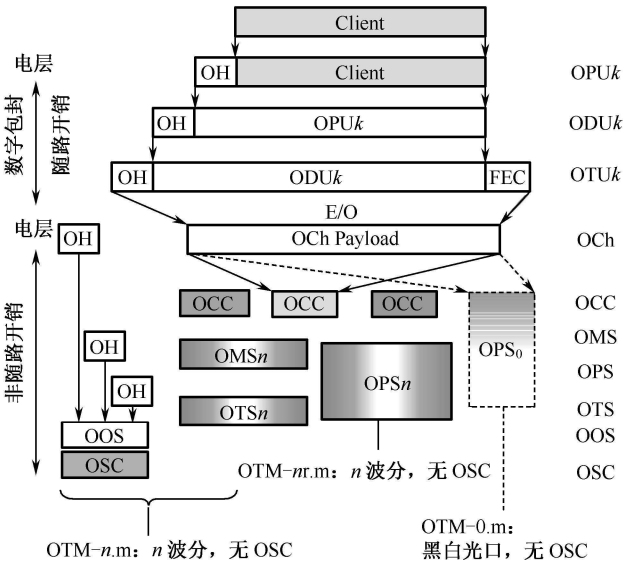


图 12-3 OTN 网络的层次结构和信息流之间的关系

完整的 OTN 技术体制包含电层和光层, 电层主要完成客户信号从 OPU 到 OTU 的

逐级适配、复用，最后转换成光信号调制到 OCC 上，光层主要完成 OCh 信号的逐级适配、复用。ODU 和 OCh 层还具有连接（connection）功能，实现本层的特征信息在输入输出端口间的交叉调度。

在 OTU 层及光层，分别定义两类可选的功能模块。在 OTU 层分别叫 OTU k 及 OTU k V，二者主要区别是 OTU k V 对复帧、ODU 同步映射及 FEC 的支持是可选的。在光层分为完整功能和简化功能的两类，分别是 OC/OTM-nm3 和 OChr/OTMnr/OTM-0 (OPS n)，它们的区别在于简化功能的模块不支持非结合开销，通道数 n 最大值为 16，而完整功能的 OTM- n 支持的最大通道数目未明确定义。

4. OTN 网络

OTN 网络可用 OCh, OTU, ODU, 客户信号等元素来描述，图 12-4 描述了基于特定设备形态的 OTN 网络模型，更进一步阐述了 OTN 分层网络的实现方法及各层网络路径之间的逻辑关系。

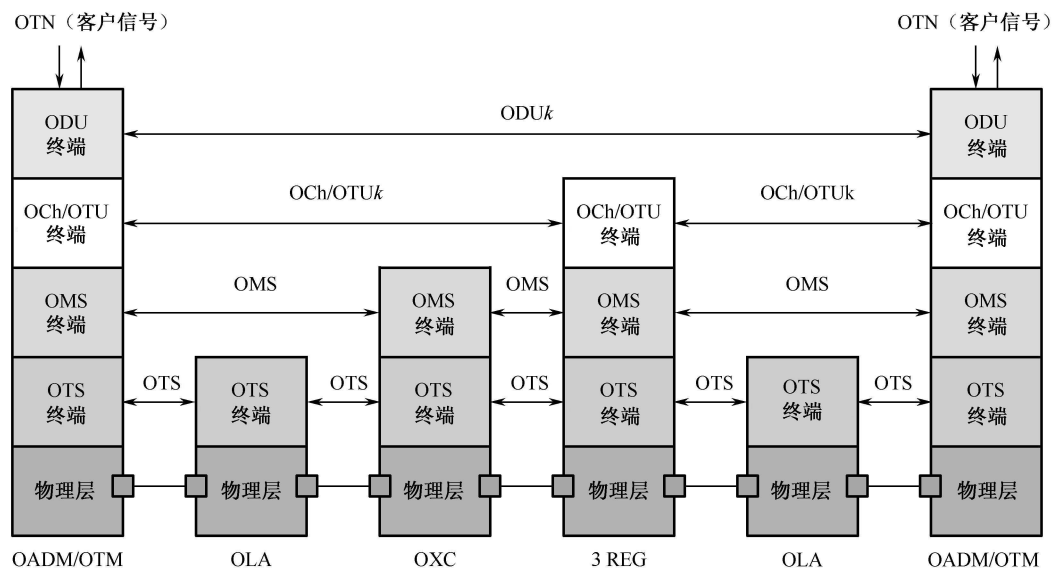


图 12-4 OTN 分层网络

5. OTN 关键技术

1) 光层信号结构

OTN 光层信号分为 OTM- n .m, OTM-16r.m, OTM-0.m 三类，其信号结构和主要特征分别如下。

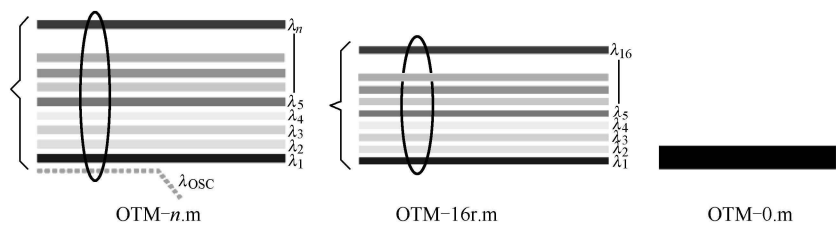


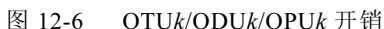
图 12-5 光层信号结构

- n 波波光传送模块信号，固定信道间隔；
- 信号速率和帧格式符合 ITU-TG.709 建议；
- 1 路独立的光监控信道（OSC）用于传送 OTM 开销信号（OOS）；
- OTM 开销信号（OOS）包括：OTS，OMS，OCh 开销以及光层通信管理信息等。

- 16 波波分光传送模块信号，固定信道间隔；
- 物理层参数遵循 G.951.1 建议，信号速率和帧格式遵循 G.709 建议；
- 无光监控信道 OSC。

- 单通道光传送模块信号，黑白光口（1 310~1 550 nm）；
- 物理层参数遵循 G.959.1 建议，信号速率和帧格式遵循 G.709 建议；
- 无光监控信道 OSC。

SDH 信号有一种基本的帧结构 STM-1, 更高速率的信号则由 $N \times \text{STM-1}$ 信号间插入构成, 这样在不同速率情况下每一帧传送所需的时间相同。同样, OTN 也有一种基本的帧结构 OTU k (参见图 12-6), 不同速率 ($k=1, 2, 3$) 情况下, 帧大小保持不变, 而每一帧传送所需的时间不相等。



(1) OTU 开销包含光通道传输功能的信息，定义了 FAS, MFAS, GCC0, SM (包括 TTI, BIP-8, BDI, BEI/BIAE, IAE) 等开销。其中, FAS 为固定格式 (F6F6F6282828) 的定帧序列; MFAS 为复帧序列, 从 0 开始每帧增加 1, 到 255 (值为 $0 \times FF$) 后又从 0 开始循环; GCC0 为通用通信通道, 用于传递网元之间的管理信息; TTI 用于 OTU 段层连通性监视; BIP-8 用于 OTU 段层信号误码监测; BDI 向上游的源端反向传递信号失效信息; BEI 向上游的源端传递误码信息; BIAE 向上游源端传递输入对齐错误信息; IAE 反映源端的输入对齐错误信息。

• 217 •

C-CC1/C-CC2, APS/PCC, FTFI 等开销。其中 TCM 用于串连连接监测, PM 用于 ODU 层的通道监测, APS/PCC 用于传递光通道保护倒换协议, FTFI 传递故障类型和故障位置。

(3) OPU 层开销支持客户信号适配相关的开销, 定义了 PSI (payload structure indicator) 开销, 用于承载客户信号类型等信息。调整控制字节 (JC) 结合正负调整机会字节 (PJO/NJO) 完成一定范围内的字节调整。

通过数字包封和丰富的管理开销, 保证客户信号透明传送的同时又能实现精确的管理和监控, 这是 OTN 的一项重大进步。

3) 客户信号影射和复用

OTN 定义了两种客户信号适配进 OTN 网络的途径 (参见图 12-7); 通过数字包封适配进 ODU 和直接适配到 OCh。客户信号虽然可以无须封包到 OTU 中而直接适配在光信道上传送, 但无法支持与 OTU 相关的 OAM 功能。

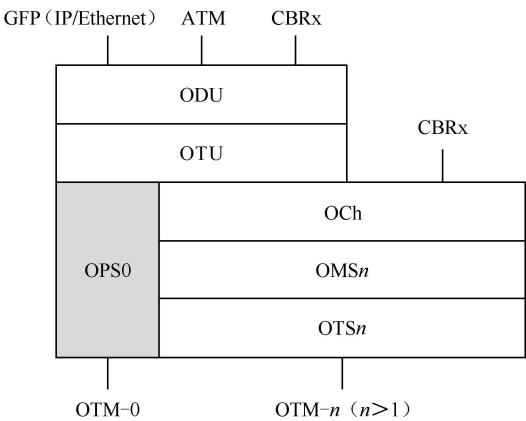


图 12-7 客户信号适配

图 12-8 显示了各种信息结构元之间的关系, 同时阐明了 OTM-*n* 的复用结构和映射。

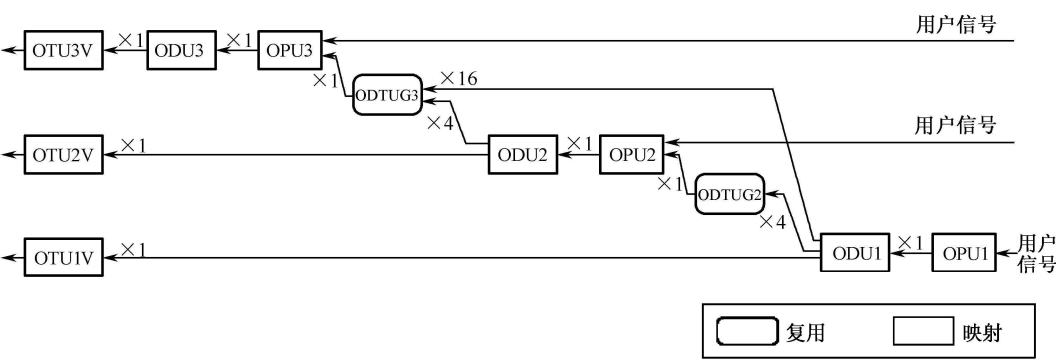


图 12-8 OTM 复用和映射结构

客户信号映射在 OPU_{*k*} 中, OPU_{*k*} 映射进 ODU_{*k*}, 而 ODU_{*k*} 映射进 OTU_{*k*}V 中。OTU_{*k*}V 映射到 OCh[*r*]中, 继而 OCh[*r*]调制在 OCC[*r*]上。

G.709 明确定义了映射过程的客户信号包括 CBR2G5/CBR10G/CBR40G、ATM 信元、

GFP 帧，另外对用于维护目的 NULL（全 0）信号和 PRBS 信号也做了定义。对于其他目前常见的业务信号则需厂家采用特殊的方法实现，例如 STM-1/4 信号、GE/10GE 信号等。对于 CBR 信号（STM-N），OTN 支持异步和比特同步两种映射方式。异步映射时，OPU_k 信号由 OTN 设备本身的时钟产生，与 CBR 信号无关，并使用正/负/零调整机制以容忍一定的频偏。比特同步映射时，OPU_k 时钟来自于 CBR 客户信号，不使用 OPU_k 帧内的调整能力。

图 12-8 还说明了在 OTN 体制中存在两种复用：波分复用和时分复用。在光层， n ($n \geq 1$) 个 OCC[r]根据波分复用被复用进一个 OCG- n [r]m 中，OCG- n [r]m 中的 OCC[r]支路时隙可以具有不同的容量。OCG- n [r]m 通过 OTM- n [r]m 传送。对于完整功能的 OTM- n .m 接口，OSC 通过波分复用被复用进 OTM- n .m 中。在电层，可能的时分复用结构包括：最高 4 个 ODU1 信号复用进一个 ODTUG2 中，也可将 j ($j \leq 4$) 个 ODU2 和 $16-4j$ 个 ODU1 信号的混合复用到一个 ODTUG3 中，ODTUG3 再复用到 OPU3 中。

4) 虚级联

OTN 支持 OPU_k 信号的虚级联 OPU_k-X_v ($X=1.256$)，以提高比 OPU_k 容量更大的连续的净荷承载区域，OPU_k-X_v 的帧结构如图 12-9 所示。

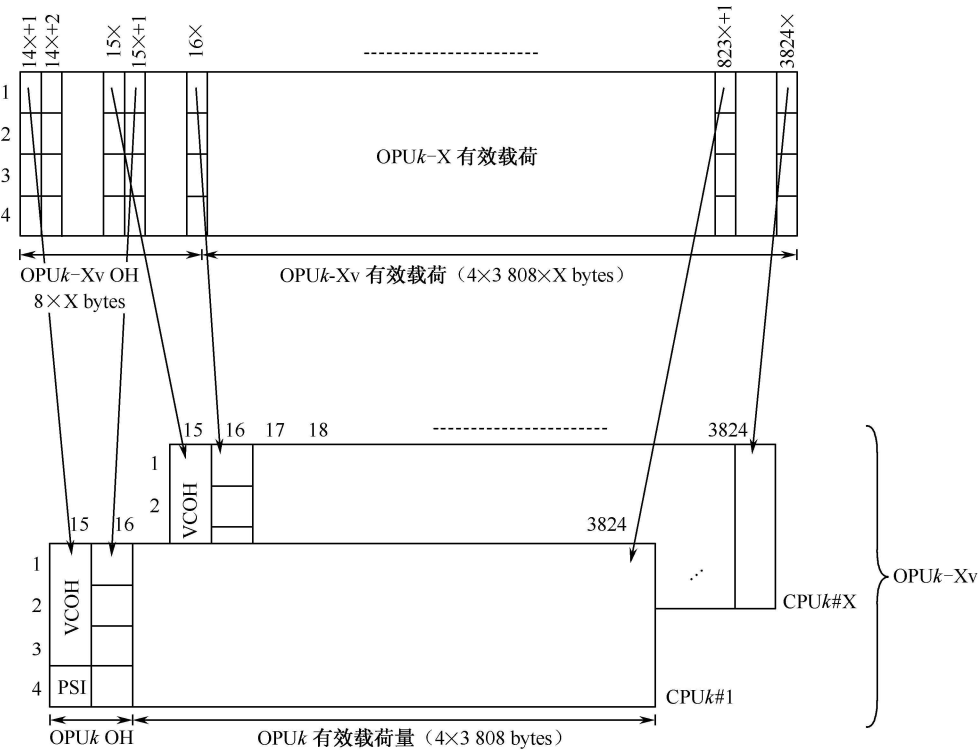


图 12-9 OPU_k-X_v 帧结构

OPU_k-X_v 的开销包括 X 个净荷结构标识 PS，和 X 个虚级联开销 VCOH，用于虚级联特定序列和复帧指示。PS 中包括净荷类型 PT，对每个 OPU_k 值都是同样的。每个 VCOH 开销有 3 个字节，包括的内容有虚级联复帧指示 MF11/MF12、序列号指示符 SQ，LCAS 相关开销(如 CTRL，MST 等)。每个 OPU_k-X_v 中 OPU_k 在一个 ODU_k 中传输，X 个 ODU_k

组成 ODU_k-X_v。每个 ODU_k 单独在网络中传输，由于存在不同传输延时，导致每个 ODU_k 到达终点的时间不同，必须进行延时补偿，使各自独立的 OPU 对齐以便能够访问连续的净荷区域。采用虚级联技术，可实现在低速网络中传送高速率信号，例如将 STM-256 信号映射到 ODU2-4_v 或 ODU1-16_v 信号中传送，也可用于优化数据业务的传送、带宽收敛和无损带宽调整（LCAS）。

6. 网络保护

1) 保护的种类

OTN 定义了三种类别的保护，分别是：路径保护、子网连接保护和共享保护环。

路径保护为专属端到端保护机制，可用于任何物理结构（网状网、环型网和混合网）。如果工作路径失效或性能跌至最低要求，工作路径将由保护路径代替。路径保护可单向管理也可双向管理。可以是 1+1 方式，也可以是 1：N 方式。

子网连接保护同样为专属保护机制，可用于任何物理结构（网状网、环型网和混合网），可用来保护网络的全部或部分。子网连接保护又可划分为 SNC/I，SNC/N，SNC/S（基于 TCM 子层监视的保护倒换）三类。SNC/I 对服务层的失效和劣化执行保护，倒换处理和缺陷检测处理，这些功能由两个相邻的层完成，其中服务层提供缺陷和劣化检测处理，而客户层根据服务层的信息执行保护倒换；SNC/N 使用客户层信息来保护服务层失效和客户层失效与劣化。SNC/S 使用在子层创建的路径来保护失效。SNC/I，SNC/N，SNC/S 支持 1+1 单/双向保护方式，SNC/I 和 SNC/S 可支持 1：N（ $1 \leq N \leq 255$ ）保护方式。

共享保护环为每个连接提供了 1：1 方式的保护路由和保护容量。在无故障情况下，保护连接本身并没有传送工作连接的备份，因此保护容量没有占用，而可传送低优先级的额外业务。额外业务是不受保护的，该保护容量可与其他保护连接共享。

2) 保护的网路层次

OTN 定义了三个层次的网络保护，即 OMS 层、OCh 层和 ODU 层，而 OTS，OPS 和 OTU 层不适用连接和保护功能。OMS 层仅定义了 1+1 单向路径保护倒换，OCh 层仅定义了恢复式或非恢复式 SNC/N。

7. OTN 的维护管理

相对于传统 WDM 设备，OTN 在光层的维护管理能力大大增强。光层开销需通过 OSC 传送，G798 建议定义 OSC 应传送的 OTS/OMS/OCh 开销逻辑信号，但 OSC 的具体实现格式未做要求。传统的 WDM 设备基本上只实现了连续性监控（LOS 监控）和部分管理通信功能。

8. OTN 设备形态

OTN 技术涵盖了电层接入、适配、复用、交叉、保护和光层适配、复用、保护功能。不同设备由于网络地位的不同，功能侧重点有较大差别，并不会实现标准要求的所有功能。基于 OTN 技术实现的可以有 OXC，OADM，OTM，OLA 等设备形态或它们之间的结合。典型的 OTN 设备如图 12-10 所示。

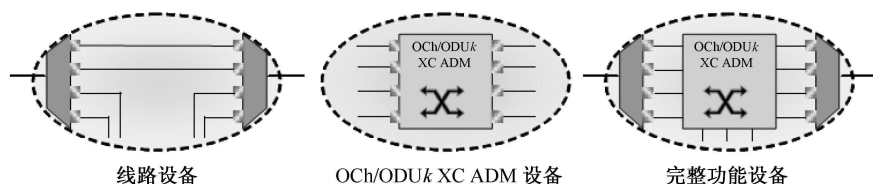


图 12-10 常见的 OTH 设备形态

- (1) 线路设备：OTN 接口设备，扩展线路容量和 OCh 通道的传输距离；
- (2) OCh/ODUk XC ADM 设备：部署于网络核心位置，在不同 OTN/WDM/SDH 网络间提供大容量的 OCh，ODU 交叉调度；
- (3) 完整功能设备：根据 ADM 和线路容量的不同，应用范围可覆盖从接入到核心网络，构建全 OTN 网络。

9. OTN 的特点分析

1) 容量的扩展性强

SONET/SDH 定位于话音业务的传送，提供低阶和高阶（如 155 Mb/s）两种级别交叉，当线路速率提高到 10 Gb/s, 40 Gb/s 或 IP 等 Packet 业务时，连续级联虽然能解决问题，但管理困难，同时 T 级别的交叉容量较难实现。

OTN 体制消除了交叉速率上的限制，可随着线路速率的增加而增加，也可通过反向复用来适应线路速率的变化，即各个部分可分别设计、独立发展，可扩展性好，几十倍 T 级别的交换容量较易实现，且成本低，易于管理。

2) 客户信号的透明

OTN 定义的 OPU_k 容器，可以适配任意客户业务包含 SDH/SONET, ATM, Ethernet, SAN, Video 业务而不更改他们任何净荷和开销信息，异步映射模式也保证了客户信号定时信息的“透明”，并提供有效的管理。

3) 更强的 FEC 性

G.709 为 OTN 帧结构定义了带外 FEC 纠错算法，FEC 校验字节长达 4×256 bytes，使用 RS (255, 239) 算法，可以带来最大 6.2 dB (BEE=10E-15) 编码增益，降低 OSNR 容限，延长电中继距离，减少系统站点个数，降低建网成本。

4) 多级的串联连接监视能力

相对于 SDH/SONET 只能提供 1 级 TCM 能力，OTN 可以提供 6 级连接监视功能，对于多运营商多设备商多子网环境，可以实现分级和分段管理。

5) 消除全网同步限制

SDH/SONET 系统由于采用同步复用方式，要求全网同步。而 OTN 采用异步映射复用机制，不需要系统全网同步，消除了由于同步带来的限制，可以简化系统设计，降低实现成本，同时也可节省时钟同步设备的建设成本。

6) 业务处理灵活，减少运营成本

OTN 设备相对传统 WDM 设备在业务处理上的最大区别在于：传统 WDM 设备使用 TMUX 方式将子速率业务直接复用到波道上，只能点到点地传送，无法兼顾波道带宽高

利用率和端到端的灵活调度，而 OTN 设备具备和 SDH 类似的特性，支持子速率业务的映射、复用和交叉连接，两方面均得到满足。

OTN 和传统 WDM 在处理子速率业务方式上不同，为了提到波道带宽利用率，OTN 需要在有子速率业务上下的节点对业务波道解复用和重新复用。对 Continue 业务，传统 WDM 设备需要将该业务完全恢复出后跨接到另外的 TMUX 模块上，业务初期的提供及后期的扩容，每个节点均须人工参与连接，而 OTN 设备对 Continue 业务的跨波道连接可通过网管操作完成，缩短业务提供时间，减少网络运营成本。

传统 WDM 不具备光/电层的调度能力，连接固定，只定位于简单的业务承载、扩展传输距离和节省光纤的应用，基于 OTN 的传送设备具有波长/子波长复用、交叉连接能力，同时能够提供强大的 OAM 功能，提升网络生存性，可构建灵活的、可管理可运营的光传送网络。通道交叉连接功能的集成，还使 OTN 设备具备了支持波长/子波长级、ASON/GMPLS 功能的能力。

OTN 技术体制不太完善的地方是对 GE/10GE LAN 业务的适配和映射没有明确的定义。GE/10GE LAN 的带宽与 OPUk 的带宽不匹配，用 OPU1 传送一路 GE 显得带宽利用率偏低，如果传送两路 GE，采用 GFP 直接异步映射进同一 OPU1 时，业务的透明性和 GE 之间的隔离又成为一个问题；同时标准的 OPU2 容器（9.995 Gb/s）却没有足够的带宽来传送 10GE LAN 信号（10.312 5 Gb/s）。

OTN 技术兼有传统 SDH，SONET 和 WDM 的优势，同时又保持了对他们的兼容能力。OTN 在光层信息传送距离和信息传递容量上，传输技术的实现上与现有 WDM 技术没有本质区别。在电层 OTN 使用异步的映射和复用，采用最经济的空分交叉技术，实现了大颗粒业务的交叉连接。实现了具有智能化功能的业务调度和网络生存保护功能。经过近十年的研究和发展，OTN 技术标准已基本完善，产品已趋成熟，接口 OTN 化的 SDH/SONET/WDM 设备也已取得大量应用。随着 IP 化浪潮的逐步来临，OTN 在构建灵活的宽带传送网络中有着广阔的应用前景。

缩 略 语

AAF	Analog Adaptive Filter	模拟自适应滤波器
ACM	Access Control Model	接入控制模块
ADM	Add-Drop Multiplexer	分插复用器
AEE	Adaptive Electronic Equalization	自适应电子均衡
AFR	Absolute Frequency Reference	绝对参考频率
AIS	Alarm Indication Signal	告警指示信号
AMA	Automatic Message Account	自动消息计费
AON	All Optical Network	全光网
AP	Access Point	接入点
API	Access Point Identifier	接入点标志
APR	Automatic Power Reduction	自动功率减小
APS	Automatic Protection Switch	自动保护倒换
APSD	Automatic Power Shutdown	自动功率关断
AS	Autonomy System	自治系统
ASE	Amplified Spontaneous Emission	放大自发辐射噪声
ASK	Amplitude Shift Keying	幅移键控
ASON	Automatic Switched Optical Networ	自动交换光网络
ATM	Asynchronous Transfer Mode	异步传送模式
BA	Booster Amplifier	功率放大器
BDI	Backward Detection Identifier	后向检测标识
BER	Bit Error Rate	比特误码率
BGP	Border Gateway Protocol	边界网关协议
BLSR	Bidirectional Line Switching Ring	双向线路倒换环
BN	Border Node	边界节点
BOD	Bandwidth On Demand	带宽按需分配
BPSK	Binary Phase Shift Keying	二进制相移键控
BSHR	Bidirectional Self-Healing Ring	双向自愈环
CAC	Connect Accept Control	连接接纳控制
CC	Call Controller	呼叫控制器
CCC	General Communications Channel	通用通信通道
CCI	Connection Controller Interface	连接控制器接口
CCID	Control Channel Identifier	控制通道标识符
CCM	Connection Control Model	连接控制模块
CD	Code Diversion	码分
CD	Control Domain	控制域

CDM	Code Division Multiplexing	码分复用
CDN	Content Delivery Network	内容传递网络
CDR	Call Detail Recorder	呼叫详细记录
CDR	Clock and Data	时钟数据再生
CE	Client Edge Devices	用户边缘(设备)
CMI	Code Mark Inversion	代码标记转换
CMIP	Common Management Information Protocol	公共管理信息协议
CMIS	Common Management Information Services	公共管理信息服务
CN	Core Network	核心网
CNE	Client Network Element	客户网络单元
CNM	Customer Network Management	用户网络管理
COM	Common Object Model	公共对象模型
COMMSOH	General Management Communications Overhead	通用管理通信开销
CoS	Class of Service	业务分类等级
CP	Connection Point	连接点
CPU	Center process unit	中央处理单元
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校验
CRM	Client Relationship Management	客户关系管理
CRZ	Chirped Return-to-Zero	啁啾归零码
CSRZ	Carrier Suppressed Return-to-Zero	载波抑制归零
CTP	Connection Termination Point	连接终端点
CW	Continuous Wave	连续波
CWDM	Coarse Wave Division Multiplexing	粗(稀疏)波分复用
DA	Discovery Agent	发现代理
DAS	Direct Access Storage	直接存储
DBMS	Database Management	数据库管理系统
DCC	Data Communication Channel	数据通信通道
DCF	Dispersion Compensation Fiber	色散补偿光纤
DCG	Dispersion Compensation Grating	色散补偿光栅
DCM	Dispersion Compensation Module	色散补偿模块
DCN	Data Communication Network	数据通信网
DCOM	Distributed Common Object Model	分布式公共对象模型
DDI	Double Defect Indication	双缺陷指示
DDR	Domain-to-Domain Routing	域到域路由
DDRP	Domain-to-Domain Routing Protocol	域到域路由协议
DEDFA	Distributed Erbium-Doped Fiber Amplifier	分布式掺铒光纤放大
DFB-LD	Distributed Feedback	分布反馈激光器二极管
DFE	Decision Feedback Equalizer	判决反馈均衡器
DFRA	Distributed Fiber Raman Amplifier	分布式光纤喇曼放大器

DGE	Dynamic Gain Equalization	动态增益均衡
DII	Dynamic Invocation Interface	动态调用接口
DLE	Dynamic Ligh tpath Establishment	动态光路建立
DM	Directory Manager	目录管理器
DMS	Dispersion Managed Soliton	色散管理孤子
DNI	Dual Node Interlinkage	双节点互连
DPSK	Differential Phase Shift Keying	差分相移键控
DRM	Digital Rights Management	数字版权管理
DRS	Double Rayleigh Scattering	双重瑞利散射
DSF	Dispersion Shift Fiber	色散位移光纤
DSI	Dynamic Skeleton Interface	动态框架接口
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理
DVMRP	Distance Vector Multicast Routing Protocol	距离矢量组播路由协议
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	密集波分复用
DXC	Digital Cross Connection	数字交叉连接
EAM	Electrical Absorption	电吸收调制
ECC	Embedded Communication Channel	嵌入通信通道
ECD	Error Code Detector	误码仪
EDC	Electronic Dispersion Compensation	电色散补偿
EDF	Erbium-Doped Fiber	掺铒光纤
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	掺铒光纤放大器
EFEC	Enhanced Forward Error Correction	增强型 EFC
EMS	Element Management System	网元管理系统
E-NNI	External Network-to-Network Interface	外部网络—网络接口
ESCON	Enterprise Systems Connection	企业系统连接
EX	Extinction Ratio	消光比
FC	Fiber Channel	光纤通道
FC	Fibre Connection	光纤连接
FC-AL	Fibre Channel-Arbitrated Loop	光纤通道仲裁环
FCC	Fiber Cross Connect	光纤交叉连接
FCIA	Fibre Channel Industry Association	光纤通道产业协会
FDDI	Fiber Distributed Data Interface	光纤分布式数据接口
FDI	Forward Defection	前向缺陷指示
FDI	Forward Detection Identifier	前向检测标志
FEC	Forward error correction	前向纠错
FF	Fixed-Filter	固定过滤器
FPDC	Fiber Passive Dispersion	光纤无源色散补偿器
FR	Frame Relay	帧中继
FSC	Fiber-Switch Capable	光纤交换能力
FSM	Finite State Machine	有限状态机

FT	Fault Tolerant	故障容忍
FWM	Four wave Mixing	四波混频
GbE	Gigabits Ethernet	吉位以太网
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching	通用多协议标签交换
GOS	Grade of Service	业务等级
GRE	Generalized Routing Encapsulation	通用路由封装
GUI	Graphical User Interface	图形用户接口
GUNI	Grid User Network Interface	网格用户网络接口
HDLC	High-level Data Link Control	高级数据链路控制
HDTV	High Definition Television	高清晰度电视
HIPPI	High Performance Parallel Interface	高性能并行接口
HSM	Hierarchical Storage Management	分级存储管理
IAD	Integrated Access Device	综合接入设备
ICMP	Internet Control Message Protocol	网际控制报文协议
ID	Identifier	标志符
IDE	integrated development environment	集成开发环境
IDL	interface description language	接口描述语言
IETF	Internet Engineering Task Force	因特网工程任务组
IGMP	Internet Group Managment Protocol	因特网组管理协议
IGP	Internal Gateway Protocol	内部网关协议
IIOP	Internet Inter-ORB Protocol	互联网内部对象请求代理协议
ILEC	Incumbent Local Exchange Carrier	传统本地交换运营商
ILP	Integer Linear Programming	整数线性规划
I-NNI	Internal-Network to Network interface	内部网络—网络接口
IP	Internet Protocol	因特网协议
IPCC	IP Control Channel	IP 控制通道
IPSeC	Internet Protocol Security	因特网协议安全
IPX	Internet Packet Exchange	因特网分组交换
ISDN	Integrated Service Digital Network	综合业务数字网
IS-IS	Intermediate System-Intermediate System	中间系统—中间系统
IS-IS-TE	Intermediate System-IntermediateSystem Traffic Engineering	中间系统-中间系统流量工程
ISO	International Standards Organization	国际标准化组织
ISP	Internet Service Provider	因特网服务提供商
ITU-T	International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization	国际电信联盟电信标准部
JBOD	Just Bundle Of Disks	磁盘簇
L2SC	Layer 2 Switch Capable	二层交换能力
L2TP	Layer 2 Tunnel Protocol	第二层隧道协议
LAN	Local Area Network	局域网, 本地网

LAPS	Link Accept Protocol-SDH	链路接入协议-SDH
LC	Link Connection	链路连接
LCAS	Link Capacity Adjustment Scheme	链路容量调整结构
LCN	Local Communications Network	本地通信网
LD	Laser Diode	激光二极管
LD	Link Degradation	链路信号退化
LDP	Label Distribution Protocol	标签分发协议
LER	Label Edge Router	标签边缘路由器
LF	Link Failure	链路失效
LLC	Logical Link Control	逻辑链路控制
LMP	Link Management Protocol	链路管理协议
LOBS	Label Optical Burst Switching	标签光突发交换
LOF	Loss of Frame	帧丢失
LOL	Loss of Light	光丢失
LOS	Loss of Signal	信号丢失
LPOH	Lower order Path Overhead	低阶通道开销
LPT	Link Protection Type	链路保护类型
LRMA	Link Resource Manager A	链路资源管理器 A 端
LRMZ	Link Resource Manager Z	链路资源管理器 Z 端
LSA	Link state Advertisement	链路状态通告
LSC	Length Switch Capable	波长交换能力
LSDB	Link State Data Base	链路状态数据库
LSN	Logical Sub-Network	逻辑子网
LSP	Label Switched Path	标签交换路径
LSP	Link State PDU	链路状态 PDU
LSR	Label Switching Router	标签交换路由器
MAC	Media Access Control	媒质接入控制
MAN	Metropolitan Area Network	城域网
MCN	Management Communication Network	管理通信网
MCU	Management and Control	管理控制单元
MCU	Multipoint Control Unit	多点控制单元
MDCP	Media Device Control Protocol	媒体设备控制协议
MDI	Medium Dependent Interface	媒质相关接口
MDI	Multiple document	多文档界面
MEMS	Micro-electro Mechanical System	微电子机械系统
MG	Media Gateway	媒体网关
MGC/CA	Media Gateway Controller / Call Agent	媒体网关控制器/呼叫代理
MGCP	Media Gateway Control Protocol	媒体网关控制协议
MGOXC	Multi-Granularity Optical Cross-Connect	多粒度光交叉连接
MP	Management Panel	管理平面

MPLS	Multi-Protocol Label Switching	多协议标签交换
MS	Management System	管理系统
MSOH	Multiplex Section Overhead	复用段开销
MSP	Multiplex Section	复用段保护
MSTP	Multi-Service Transport Platform	多业务传送平台
MTNM	Multi-Technology Network Management	多技术网络管理
MTU	Maximum Transmission Unit	最大转发单元
NAS	Network Attached Storage	网络连接存储
NAT	Network Address Translation	网络地址转换
NCC	Network Call Controller	网络呼叫控制器
NCP	Net control processor	主控板
ND	Neighbor Discovery	邻居发现
NE	Network element	网络单元
NEF	Network Element Function	网络单元功能
NFS	Network File System	网络文件系统
NMCC	Network Manage Control Center	网络管理中心
NMI	Network Management Interface	网络管理接口
NMI-A	Network Management Interface-A	网络管理 A 接口
NMI-T	Network Management Interface-T	网络管理 T 接口
NMS	Network Management System	网络管理系统
NNI	Network Node Interface	网络节点接口
NRZ	Non Return to Zero	非归零码
NSAP	Network Service Access Point	网络服务接入点
NSIC	National Storage Industry Consortium	国家存储行业协会
NT	Network Termination	网络终端
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber	非零色散位移光纤
OA	Optical Amplifier	光放大板
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	光分插复用器
OAM	Operation, Administration and Maintenance	操作维护管理
OBA	Optical Booster Amplifier	光功率放大板
OBS	Optical Burst Switching	光突发交换
OC-192 / OC-768	Optical Carrier 192 / 768 (10 Gbps / 40 Gbps)	光载波速率 10 Gbps 和 40 Gbps
OC-3 / OC-12	Optical Carrier 3 / 12 (155 Mbps / 622 Mbps)	光载波速率 155 Mbps 和 622 Mbps
OCH	Optical Channel	光通道
ODP	Open Distributed Processing	开放的分布式处理
ODSI	Optical Domain Service Interconnect	光域业务互联
ODU	Optical Demultiplexer Unit	光分波板
ODU	Optical Data Unit	光数据单元

OEO	Optical-Electrical-Optical	光 / 电 / 光变换
OFC	Open Fiber Control	开放光纤控制
OHP	Order wire	公务板
OIF	Optical Internetworking Forum	光互联网论坛
OLA	Optical Line Amplifier	光线路放大板
OLS	Optical Line System	光线路系统
OLT	Optical Line Termination	光线路终端
OMS	Optical Multiplex Section	光复用段
OMU	Optical Multiplexer Unit	光合波板
ONE	Optical Network Element	光网络单元
ONNS	Optical Network Navigation System	光网络导航系统
ONSM	Optical Network Service Management	光网络服务管理
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
OOS	OTM Overhead Signal	OTM 开销信号
OP	Optical Protection Unit	光保护单元
OPA	Optical Pre-amplifier	光前置放大板
OPEX	Operational Expenditure	运营维护成本
OPM	Optical Performance Monitor	光性能监测模块
OPS	Optical Packet Switching	光分组交换
OPU	Optical Payload Unit	光净荷单元
ORB	Object Request Broker	对象请求代理
ORS	Optical Relay Section	光中继段
OS	Operations System	操作系统
OSC	Optical Supervisory Channel	光监控信道
OSF	Operations System Function	操作系统功能
OSI	Open Systems Interconnection	开放系统互连
O-SLA	Optical Service Level Agreement	光网络服务等级协定
OSNR	Optical Signal-to-Noise Rate	光信号噪声比
OSRP	Optical Switching and Routing Protocol	光交换和路由协议
OSS	Operation Support Systems	运营支撑系统
OTDM	Optical Time-Division Multiplexing	光时分复用
OTM	Optical Terminal	光终端
OTN	Optical Transport Network	光传送网
OTS	Optical Transmission Section	光传输段
OTU	Optical Transport Unit	光传送单元
OUNI	Optical User-Network Interface	光用户—网络接口
OUT	Optical Transponder Unit	光转发板
OVPN	Optical Virtual Private Network	光虚拟专用网
OXC	Optical Cross Connect	光交叉连接
PAN	Personal Area Network	个人局域网

PC	Permanent Connection	永久连接
PC	Protocol Controller	协议控制器
PDC	Passive Dispersion Compensator	无源色散补偿器
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	准同步数字体系
PDP	Police Decision Point	策略决定点
PDU	Packet Data Unit	包数据单元
PE	Provider Edge (Optical Network Element)	提供商边缘(光网元)
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏振模色散
POH	Path Overhead	通道开销
PON	Passive Optical Network	无源光网络
PPP	Point-to-Point Protocol	点到点协议
PPTP	Point to Point Tunnel Protocol	点到点隧道协议
PSC	Packet-Switch Capable	分组交换能力
PSTN	Public Switched Telephone Network	公共交换电话网
PVC	Permanent Virtual Connect	永久虚连接
PXC	Photonic Cross-Connect	光子交叉连接
QoS	Quality of Service	服务质量
R2	Return to Zero	归零（码）
RA	Routing Area	路由域
RC	Route Controller	路由控制器
RCD	Routing Control Domain	路由控制域
RDB	Routing Information Database	路由信息数据库
RFID	Radio Frequency Identification	射频识别
RP	Routing Performer	路由执行器
RPR	Resilient Packet Ring	弹性分组环
RSOH	Regenerator Section Overhead	再生段开销
RSVP	Resource Reservation Protocol	资源预留协议
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol-TE	基于流量工程的资源预留协议
RTCP	Real-time Transport Control Protocol	实时传输控制协议
RTP	Real-time Transport Protocol	实时传输协议
RWA	Routing and Wavelength Assignment	路由和波长分配
SAN	Storage Area Network	存储区域网
SBS	Simulated Brillouin Scattering	受激布里渊散射
SC	Switched Connection	交换连接
SCE	Service Capability Exchange	业务能力交换
SCM	Sub-carrier Multiplexing	副载波复用
SCN	Signaling Communication Network	信令通信网
SCSI	Small Computer System Interface	小型计算机接口
SCTP	Streaming Control Transmission Protocol	流控制传输协议
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	同步数字系列

SDM	Space Division Multiplexing	空分复用
SG	Signaling Gateway	信令网关
SID	Sub-network ID	子网 ID
SI-IR	Self-Healing Ring	自愈环
SLA	Service Level Agreement	服务等级协定
SLE	Static Light path Establishment	静态光路建立
SMF	Single Mode Fiber	单模光纤
SMI	Structure of Management Information	管理信息结构
SMM	Survivability Management Model	生存性管理模块
SMS	Service Management System	业务管理系统
SNC	Sub-Network Connection	子网连接
SNMP	Simple Network Management Protocol	简单网络管理协议
SNMS	Sub-Network Management System	子网管理系统
SNP	Sub-network Point	子网点
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SNTP	Sub-Network Termination Point	子网终端点
SONET	Synchronous Optical Network	同步光网络
SP	Service Provider	服务提供商
SPC	Soft Permanent Connection	软永久连接
SPF	Shortest Route First	最短路径优先算法
SPM	Self-Phase Modulation	自相位调制
SPVC	Soft Permanent Virtual Connect	软永久虚连接
SRA	Simulated Raman Amplifier	受激喇曼放大
SRG	Shared Risk Group	共享风险组
SRLG	Shared Risk Link Group	共享风险链路组
SRM	Storage Resource Management	存储资源管理
SRS	Simulated Raman Scattering	受激喇曼散射
SSB	Single Side Band	单边带
SSF	Service Signal Failure	业务信号故障
SSMF	Standard Signal Mode Fiber	标准单模光纤
STM	Synchronous Transfer Module	同步传送模块
SVC	Switched Virtual Circuit	交换虚电路
TBA	To Be Announced	应予宣布
TBD	To Be Determined	待决定
TCP	Terminal Connection Point	终端连接点
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TDCM	Tunable Dispersion Compensation Module	可调色散补偿模块
TDM	Time-Division Multiplexing	时分复用
TED	Traffic Engineering Database	流量工程数据库
TFTP	Trivial File Transfer Protocol	简单文件传送协议

TID	Tunnel Identifier	隧道标志
TIM	TTI Mismatch	TTI 失配
TMF	Tele-Management Forum	电信管理论坛
TMN	Telecommunication Management Network	电信管理网络
TNA	Transport Network Assigned	传送网络分配地址
TPC	Turbo Product Code Turbo	乘积码
TTI	Trail Trace Identifier	路径踪迹标识
TTP	Trail Termination Point	终端连接点
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
ULH	Ultra long Haul	超长距离
UNI	User-Network Interface	用户—网络接口
UNI-C	Client side of UNI	用户侧的用户网络接口
UNI-N	Network side of UNI	网络侧的用户网络接口
UTC	Universal Time Coordinated	公共同等时间
VC	Virtual Container	虚容器
VCI	Virtual Channel Identifier	虚信道识别
VCPA	VC Path Adaptation	VC 路径适配
VCPT	VC Path Termination	VC 路径终端
VLAN	Virtual-LAN	虚拟局域网
VNC	Virtual Network Computing	虚拟网络计算
VOA	Variable Optical Attenuator	可变光衰减器
VOD	Video-On-Demand	视频点播
VoIP	Voice over Internet Protocol	IP 电话
VP	Virtual Path	虚通道
VPi	Virtual Path Identifier	虚路径识别符
VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网
VS	Virtual Source	虚拟资源
VSF	Vestigial Side Band	残留边带调制
VWP	Virtual WP	虚波长通道机制
WAN	Wide Area Network	广域网
WBPA	Wave Band Path Adaptation	波带路径适配
WBPT	Wave Band Path Termination	波带路径终端
WBSC	Wave Band-Switch Capable	波带交换能力
WBXC	Wave Band Cross Connect	波带交叉连接
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
WPA	Wavelength Path Adaptation	波长路径适配
WPT	Wavelength Path Termination	波长路径终端
WRN	Wavelength Routed Network	波长路由网络
WSF	Work Station Function	工作站功能
XPM	Cross-Phase Modulation	交叉相位调制

参 考 文 献

- [1] 张劲松, 等. 光波分复用系统. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [2] 纪越峰. 光波分复用系统. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
- [3] 党利宏. 波分复用原理与技术. 西安: 西安通信学院出版社, 2006.
- [4] 孙强, 周虚. 光纤通信系统及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] YD/T1060—2000 光波分复用系统(WDM)技术要求.
- [6] 华为技术有限公司. 现代光网络技术. 2006.
- [7] 中兴通讯股份公司. 密集波分设备培训教材. 2004.
- [8] 烽火通信科技股份有限公司. 波分复用系统测试手册. 2004.
- [9] 华为技术有限公司. DWDM 系统常见指标测试. 2004.
- [10] 纪越峰, 等. 现代通信技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [11] 吴彦文, 等. 光网络的生存性技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [12] 王承恕. 通信网新技术. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [13] 顾生华. 光纤通信技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2008.
- [14] 杨祥林. 光放大器及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [15] 敖志刚. 网络新技术概论. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [16] 李长春. 超长距离光传输技术基础及其应用, 2008.